

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Contributo do Arrefecimento Passivo por Ventilação de Habitações pela Aplicação do Método PCLR

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Sandra Sofia Nunes Branco de Almeida

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão

2015

Agradecimentos

À minha orientadora de dissertação, Professora Doutora Marta Oliveira Panão pela oportunidade para desenvolver este tema e por todos os conselhos, orientações, horas cedidas e dedicação.

À minha família, em especial à minha Avó e à minha Mãe uma vez que sem elas nada disto teria sido possível. A força e dedicação que me inculcaram ao longo de todos estes anos possibilitaram que chegasse até aqui.

Ao João, por ser o meu pilar durante todo este caminho e por ter a maior paciência do mundo para me ouvir e reconfortar em todos os momentos em que achei que não ia conseguir. Obrigada por todo o amor, dedicação, incentivo e força.

Por fim, à família que escolhi, os meus amigos da faculdade que permitiram que estes últimos 5 anos fossem sem sombra de dúvidas os melhores da minha vida. Obrigada a todos pelo companheirismo, simplicidade, convivências, gargalhadas e lágrimas. Só com vocês é que todo este percurso fez sentido.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um método simplificado que permita estimar a redução das necessidades de energia para arrefecimento, quando se utiliza a ventilação como estratégia de arrefecimento passivo. Pretende-se que possa ser aplicado em conformidade com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e para qualquer habitação, sem ser necessário informação detalhada da sua construção dependendo apenas das necessidades de energia de arrefecimento calculadas sem recurso a estratégias de arrefecimento passivo, condições climáticas e taxa de ventilação.

A metodologia baseia-se numa alteração do Método PCLR (*Passive Cooling Load Ratio*) já existente, tendo por base dados obtidos a partir de modelos de simulação baseado no modelo 5R1C e modelação computacional de transferência de calor de edifícios recorrendo ao *software EnergyPlus*. Considerou-se que os modelos de ventilação utilizados seriam com caudal imposto e com ventilação natural entre zonas.

A ventilação como estratégia de arrefecimento passivo permite atingir, para os modelos estudados, uma redução média de 50% das necessidades de arrefecimento. Para a ventilação natural entre zonas este valor pode atingir 64%.

Os resultados obtidos pelos três modelos de simulação permitiram encontrar três curvas distintas de PCLR. Através de uma análise do erro RMSE, que avalia o desvio entre os dados obtidos através da simulação e os da curva PCLR, conclui-se que a curva dos dados do modelo 5R1C apresenta um erro de 3% e a dos restantes modelos baseados no *software EnergyPlus* apresentara um erro inferior a 0.5%.

A curva PCLR encontrada a partir dos dados do *software EnergyPlus* apresenta um ajuste com coeficiente de determinação de 0.94 e erro de 0.3%.

O método desenvolvido nesta dissertação demonstrou ser de fácil aplicabilidade, estimando de uma forma simplificada a redução que se consegue atingir nas necessidades de energia para arrefecimento, através do parâmetro PCF (*Passive Cooling Fraction*), recorrendo a uma estratégia de arrefecimento passivo baseada na ventilação.

Palavras-chave: Estratégia de arrefecimento passivo; Ventilação; Método PCLR; Modelo 5R1C; Necessidades de energia para arrefecimento; EnergyPlus.

Abstract

This Master Thesis has the objective of creating a simplified method that allows the user to estimate the cooling energy needs reduction, when using ventilation as a passive cooling strategy. It's intended to be applied in conformity with "Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação" and to any kind of house, without the necessity of detailed information of its construction, depending only on calculating cooling energy needs without resorting to passive cooling strategies, weather conditions and ventilation rate.

The methodology is based on a modification of the already existing PCLR Method (Passive Cooling Load Ratio), which has its foundation in obtained data from simulation models based on the 5R1C Model, and in building heat transfer computational simulation using the EnergyPlus Software. It was considered that the ventilation models to be used would have a set flow and natural ventilation between zones.

The passive cooling ventilation system is able to reach, for the studied models, an average of 50% reductions in cooling needs and it may reach 64% when it comes to natural ventilation between zones.

The results obtained by the three simulation models made it able to find three distinct PCLR curves. Through a RMSE error analysis, that evaluates the deviation between obtained data by simulation and the PCLR curve, it's concluded that the Model 5R1C data curve presents a 3% error and the curve from the remaining models based on the EnergyPlus software presents an error less than 0.5%

The PCLR Curve found through data from the EnergyPlus software presents an adjustment with a 0.94 determination coefficient and an error of 0.3%.

The method developed in this Thesis presented to be of easy applicability, showing in a simplified way the reductions in cooling energy needs, through the PCF (Passive Cooling Fraction) parameter, resorting to a passive cooling strategy based on ventilation.

Keywords: Passive cooling strategies; Ventilation; PCLR Method; 5R1C Model; Cooling Needs; EnergyPlus.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Gráficos.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xv
Acrónimos	xvii
Simbologia e Notações.....	xix
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 - Métodos	5
2.1. Método PCLR.....	5
2.1.1. Método PCLR Original	5
2.1.2. Método PCLR Adaptado	5
2.2. Método Horário Simplificado (Modelo 5R1C).....	6
2.3. Modelação computacional de transferência de calor em edifícios	8
Capítulo 3 - Caso de Estudo	11
3.1. Edifício	11
3.1.1. Elementos Construtivos	11
3.1.2. Caracterização dos vãos envidraçados.....	12
3.1.3. Coeficiente global de transferência de calor por transmissão.....	14
3.1.4. Capacidade Térmica Mássica	16
3.2. Dados Climáticos	17
3.3. Ganhos Internos	18
3.4. Horários.....	20
Capítulo 4 -Aplicação dos métodos ao sistema de arrefecimento passivo	21
4.1. Método Horário Simplificado (Modelo 5R1C).....	21
4.2. Modelação computacional de transferência de energia em edifícios	23
4.2.1.1. Ventilação com caudal imposto	23
4.2.1.2. Ventilação natural entre zonas	25
4.3. Método PCLR.....	30
4.3.1. Ganhos de Ventilação, Q_{ve}	30
4.3.2. Necessidade de energia útil para arrefecimento, $Q_{nd, v}$	31
Capítulo 5 - Resultados e discussão.....	33
Capítulo 6 – Exemplo de aplicação do método PCLR	45

Capítulo 7	- Conclusão	51
Referências.....		53
Anexo A	-Método Horário Simplificado (Modelo 5R1C).....	55
Anexo B	-Componentes Base da Simulação em EnergyPlus™	59

Índice de Figuras

Figura 1: Distribuição do consumo elétrico no setor doméstico (Fonte: (INE & DGEG, 2010))....	1
Figura 2: Rede equivalente de acordo com a Norma ISO13790:2007 (Fonte: (ISO13790:2007, 2007))	7
Figura 3: Objetos base para o correto funcionamento e definição da simulação	9
Figura 4: Planta do apartamento	11
Figura 5: Redes térmicas do caso de estudo	22
Figura 6: Habitação utilizada para a simulação de ventilação com caudal imposto construída no software SketchUp	23
Figura 7: Habitação utilizada para a simulação de ventilação natural entre zonas construída no software SketchUp	25
Figura 8: Esquema do edifício com as variáveis necessárias para o calculo por parte do software dos coeficientes de pressão do vento (Adaptado: (EnergyPlusTM, 2015))	26
Figura 9: Variáveis necessárias para o cálculo dos fatores de largura, altura e altura inicial (Adaptado: (EnergyPlusTM, 2015))	28
Figura 10: Definição do desvio do edifício relativamente ao Norte (EnergyPlusTM, 2015)	59

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Perfil de consumo elétrico médio (Adaptado: (Pombeiro, Pina, & Silva))	19
Gráfico 2: Perfil de ganhos internos.....	19
Gráfico 3: Renovações por hora de ar novo ocorridas para o modelo de ventilação natural entre zonas para a orientação N-S.....	36
Gráfico 4: Renovações por hora de ar novo ocorridas para o modelo de ventilação natural entre zonas para a orientação E-O	37
Gráfico 5: Distribuição PCLR: Modelo 5R1C	39
Gráfico 6: Curva PCLR: Modelo 5R1C	40
Gráfico 7: Distribuição PCLR: Simulação da ventilação com caudal imposto	40
Gráfico 8: Curva PCLR: Simulação do modelo ventilação com caudal imposto.....	41
Gráfico 9: Distribuição PCLR: Simulação do modelo de ventilação natural entre zonas térmicas	41
Gráfico 10: Curva PCLR: Simulação do modelo ventilação natural entre zonas	42
Gráfico 11: Curva PCLR final: Sistema de arrefecimento passivo por ventilação	43
Gráfico 12: Curva PCLR para aplicação do método.....	48
Gráfico 13: Curva PCLR- Exemplo.....	49

Índice de Tabelas

Tabela 1: Elementos construtivos e respetiva constituição.....	11
Tabela 2: Propriedades térmicas dos materiais constituintes dos elementos construtivos.....	12
Tabela 3: Fator de correção da seletividade angular dos envidraçados (Adaptado: Despacho n.º 15793-K/2013 (Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013))	13
Tabela 4: Fator solar dos vãos envidraçados do caso de estudo	13
Tabela 5: Característica óticas do vidro	13
Tabela 6: Resistências térmicas superficiais (Adaptado: (Santos & Matias, 2006))	15
Tabela 7: Valores por defeito dos parâmetros dinâmicos para o Modelo Horário Simplificado (Adaptado: (ISO13790:2007, 2007))	16
Tabela 8: Coordenadas geográficas dos locais pretendidos para efetuar simulação	17
Tabela 9: Parâmetros input modelo 5R1C	22
Tabela 10: Parâmetros input simulação ventilação natural entre zonas.....	29
Tabela 11: Necessidades de energia para arrefecimento sem utilização do sistema de arrefecimento passivo por área de pavimento para a orientação N-S	33
Tabela 12: Necessidades de energia para arrefecimento sem utilização do sistema de arrefecimento passivo por área de pavimento para a orientação E-O	34
Tabela 13: Redução percentual das necessidades de energia para arrefecimento através da utilização do sistema de arrefecimento passivo pelo modelo de ventilação com caudal imposto e modelo 5R1C com perfil de ganhos internos variável em ambas as orientações.....	37
Tabela 14: Redução percentual das necessidades de energia para arrefecimento através da utilização do sistema de arrefecimento passivo pelo modelo de ventilação natural entre zonas com perfil de ganhos internos variável em ambas as orientações	38
Tabela 15: Erro RMSE da curva PCLR para as diferentes simulações efetuadas.....	42
Tabela 16: Características e parâmetros caso-exemplo	48
Tabela 17: Resultados finais para a habitação exemplo	49

Acrónimos

5R1C	Cinco resistências e uma capacitância
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Batiment
EN-ISO:	European Norm - International Organization for Standardization
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
NZEB	Nearly Zero Energy Building
PCF	Passive Cooling Fraction
PCLR	Passive Cooling Load Ratio
REH	Regulamente de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RMSE	Root Mean Squared Error (Raiz do Erro Médio Quadrático)
UE	União Europeia

Simbologia e Notações

ΔQ_{ve}	Acréscimo dos ganhos de ventilação, $[kWh]$
$h_{abertura}$	Altura da abertura, $[m]$
$hi_{abertura}$	Altura inicial da abertura, $[m]$
$hi_{elemento}$	Altura inicial da janela ou porta, $[m]$
$h_{elemento}$	Altura da janela ou porta, $[m]$
a_{EO}	Ângulo de azimute entre o Norte e o eixo longitudinal do edifício para a orientação E-O, $[^\circ]$
a_{NS}	Ângulo de azimute entre o Norte e o eixo longitudinal do edifício para a orientação N-S, $[^\circ]$
$A_{s,v_{n_j}}$	Área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento n com a orientação j, $[m^2]$
A_{s_i}	Área do elemento i, $[m^2]$
A_i	Área do elemento i da envolvente medida pelo interior do edifício, $[m^2]$
A_m	Área mássica efetiva, $[m^2]$
A_{op}	Área total da envolvente opaca exterior
A_w	Área do vão envidraçado incluindo vidro e caixilharia, $[m^2]$
$A_{w,Total}$	Área total dos vãos envidraçados, $[m^2]$
A_t	Área total de superfície em contacto com o volume interior, $[m^2]$
A_{pav}	Área útil de pavimento, $[m^2]$
$A_{w,N}$	Área de vão envidraçado a Norte, $[m^2]$
$A_{w,S}$	Área de vão envidraçado a Sul, $[m^2]$
C_p	Calor específico do material, $[J/K \cdot m^2]$
C_m	Capacidade Térmica Mássica, $[J/K]$
\dot{m}_{sys}	Caudal mássico do ventilador, $[kg/s]$
\dot{V}_y	Caudal volúmico de admissão na zona térmica y, $[m^3/s]$
α	Coeficiente de absorção de radiação solar da superfície do elemento da envolvente opaca, $[ad]$
Cd_{janela}	Coeficiente de descarga da janela, $[ad]$
Cd_{porta}	Coeficiente de descarga da porta, $[ad]$
a	Coeficiente em função da classe de inércia térmica do edifício
$H_{tr,v}$	Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento, $[W/^\circ C]$
$H_{ve,v}$	Coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento, $[W/^\circ C]$

$H_{ve,SP}$	Coeficiente global de transferência de calor por ventilação com utilização do sistema de arrefecimento passivo, $[W/^{\circ}C]$
H_{ext}	Coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o exterior, $[W/^{\circ}C]$
H_{enu}	Coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com espaços não úteis, $[W/^{\circ}C]$
H_{ecs}	Coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o solo, $[W/^{\circ}C]$
$H_{tr,opaco}$	Coeficiente de transferência de calor através da envolvente opaca, $[W/^{\circ}C]$
h_{is}	Coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas interior e estrela, $[W/m^2 \cdot K]$
h_{ms}	Coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas T_s e T_m , $[W/m^2 \cdot K]$
$H_{tr,w}$	Coeficiente de transferência de calor pelos vãos envidraçados, $[W/^{\circ}C]$
ψ_j	Coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear j, $[W/m^{\circ}C]$
U_i	Coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento i da envolvente, $[W/m^2^{\circ}C]$
U_{opaco}	Coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca em contacto com o exterior, $[W/m^2^{\circ}C]$
U_w	Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados, $[W/m^2^{\circ}C]$
l	Comprimento do edifício, $[m]$
H_{ve}	Condutância de Ventilação, $[W/K]$
$H_{tr,w}$	Condutância dos vãos envidraçados, $[W/K]$
$H_{tr,em}$	Condutância dos elementos pesados, $[W/K]$
$H_{tr,is}$	Condutância entre as temperaturas T_s e T_i , $[W/K]$
H_m	Condutância entre as temperaturas T_s e T_m , $[W/K]$
λ	Condutividade térmica do material, $[W/m^{\circ}C]$
ΔQ_{nd}	Decréscimo das necessidades de climatização quando se utiliza o sistema de arrefecimento passivo, $[kWh]$
ρ_i	Densidade do material, $[kg/m^3]$
B_j	Desenvolvimento linear da ponte térmica linear j medido pelo interior, $[m]$
L_v	Duração da estação de arrefecimento, $[h]$
Q_{ref}	Energia de Referência, $[J]$
Q_{sys}	Energia útil para arrefecimento do sistema AVAC, $[J]$
$I_{sol,N}$	Energia solar acumulada durante a estação para a orientação Norte, $[kWh/m^2]$
$I_{sol,S}$	Energia solar acumulada durante a estação para a orientação Sul, $[kWh/m^2]$

G_{solj}	Energia solar média incidente numa superfície com orientação j durante toda a estação de arrefecimento, $[kWh/m^2]$
Q_{ve}	Energia de ventilação extraída pelo sistema passivo, $[J]$
e	Espessura do material, $[m]$
$f_{altura\ inicial1}$	Fator de altura inicial totalmente aberta, $[ad]$
$f_{altura\ inicial0}$	Fator de altura inicial totalmente fechada, $[ad]$
$f_{altura0}$	Fator de altura para a janela totalmente fechada, $[ad]$
$f_{altura1}$	Fator de altura para a janela totalmente aberta, $[ad]$
$F_{w,v}$	Fator de correção da seletividade angular dos envidraçados, $[ad]$
F_g	Fração envidraçada, $[ad]$
$f_{largura1}$	Fator de largura totalmente aberta, $[ad]$
$f_{largura0}$	Fator de largura totalmente fechada, $[ad]$
F_{s,vn_j}	Fator de obstrução da superfície do elemento n, com a orientação j, $[ad]$
P_{rm}	Fator relativo à distribuição do fluxo de calor no nodo T_m , $[ad]$
P_{rs}	Fator relativo à distribuição do fluxo de calor no nodo T_s , $[ad]$
g_v	Fator solar, $[ad]$
$g_{\perp,vi}$	Fator solar do vidro aplicado ao vão envidraçado para uma radiação solar incidente perpendicular à superfície do vidro, $[ad]$
η_v	Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento, $[ad]$
ϕ_i	Ganhos do nodo T_i , $[W]$
ϕ_s	Ganhos do nodo T_s , $[W]$
ϕ_m	Ganhos do nodo T_m , $[W]$
$Q_{int,v}$	Ganhos térmicos associados a fontes internas de calor na estação de arrefecimento, $[kWh]$
$Q_{sol,v}$	Ganhos térmicos associados à radiação solar incidente na envolvente na estação de arrefecimento, $[kWh]$
$Q_{g,v}$	Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, $[kWh]$
$Q_{ve,SP}$	Ganhos de ventilação com utilização do sistema de arrefecimento passivo, $[kWh]$
$Q_{ve,i}$	Ganhos de ventilação sem utilização do sistema de arrefecimento passivo, $[kWh]$
q_{int}	Ganhos térmicos médios por unidade de superfície, $[W/m^2]$
$F_{schedule}$	Horário imposto para cada período do dia, $[ad]$
H_{ref}	Humidade absoluta de referência, $[kg_w/kg_a]$
i	Índice mensal, $[ad]$
$w_{abertura}$	Largura da abertura, $[m]$
w	Largura do edifício, $[m]$

$w_{elemento}$	Largura da janela ou porta, [m]
Q_{nd}	Necessidades de arrefecimento com recurso ao sistema de arrefecimento passivo, [J]
$Q_{nd,SP}$	Necessidades de energia para arrefecimento com sistema de arrefecimento passivo, [kWh]
$Q_{nd,i}$	Necessidades de energia para arrefecimento sem sistema de arrefecimento passivo, [kWh]
ϕ_m	Necessidades energéticas de climatização, [W]
n	Número de valores válidos, [ad]
P_d	Pé direito médio do edifício, [m]
P_{ref}	Pressão de Referência, [Pa]
r	Rácio entre comprimento e largura do edifício, [ad]
Λ	Razão entre a área das superfícies em contacto com o volume interior e a área de pavimento, [ad]
R_{ar}	Resistência da caixa de ar, [$m^2\text{°C}/W$]
R_k	Resistência térmica da camada k da parede, [$m^2\text{°C}/W$]
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior, [$m^2\text{°C}/W$]
R_{si}	Resistência térmica superficial interior, [$m^2\text{°C}/W$]
I_{design}	Taxa de renovação do ar interior, [RPH]
RPH	Taxa de renovação por hora do ar interior, [h^{-1}]
T_s	Temperatura estrela, [°C]
T_e	Temperatura exterior, [°C]
T_{odb}	Temperatura do ar exterior, [°C]
$T_{exterior_h}$	Temperatura do ar exterior a uma dada hora, [°C]
T_{zone}	Temperatura do ar interior da zona, [°C]
T_i	Temperatura interior, [°C]
T_m	Temperatura massa, [°C]
$\theta_{v,ext}$	Temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento, [°C]
T_{ref}	Temperatura de Referência, [°C]
T_{set}	Temperatura de referência para a abertura das janelas,
$\theta_{v,ref}$	Temperatura de referência para o cálculo das necessidades de energia na estação de arrefecimento, [°C]
$Q_{tr,v}$	Transferência de calor por transmissão através da envolvente dos edifícios, na estação de arrefecimento [kWh];
$Q_{ve,v}$	Transferência de calor por ventilação na estação em estudo sem utilização do sistema de arrefecimento passivo [kWh]
\hat{y}_t	Valor mensal correspondente aos dados calculados a partir da curva PCLR, [ad]

y_i	Valor mensal correspondente aos dados simulados, [ad]
WindSpeed	Velocidade do vento, [m/s]
V_t	Volume interior, [m ³]
V_y	Volume da zona térmica y, [m ³]

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Enquadramento geral

Segundo a Comissão Europeia (European Commission, 2015), o setor dos edifícios representa cerca de 40% do consumo de energia final na União Europeia (UE), resultando em elevados custos a nível energéticos e em emissão de gases nocivos para a atmosfera quando a energia primária é proveniente de energia fóssil. Com vista a reduzir o consumo neste setor, a UE publicou a Diretiva 2010/31/EU - Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios, que define que a partir de 1 de janeiro de 2019 os novos edifícios públicos e a partir de 1 de janeiro de 2021 os novos edifícios particulares sejam edifícios *NZEB (Nearly Zero Energy Building)*.

De acordo com Cardoso (2015), poucos Estados Membros da UE possuem uma definição concisa e oficial para estes tipos de edifícios. Portugal tem uma definição presente no Decreto-Lei n.º 118/2013, mas que ainda se encontra em fase desenvolvimento pois faltam informações adicionais (Cardoso, 2015).

Citando o artigo 16º do Decreto-Lei n.º 118/2013, os *NZEB* “são edifícios com necessidades quase nulas de energia os que tenham um elevado desempenho energético e em que a satisfação das necessidades de energia resulte em grande medida de energia proveniente de fontes renováveis, designadamente a produzida no local ou nas proximidades.”

Apesar de ainda não estarem estabelecidas pormenorizadamente, a nível nacional, os requisitos *NZEB* para novos edifícios e edifícios existentes (Cardoso, 2015), é necessário o desenvolvimento de aplicações que reduzam os consumos energéticos dos edifícios na sua globalidade.

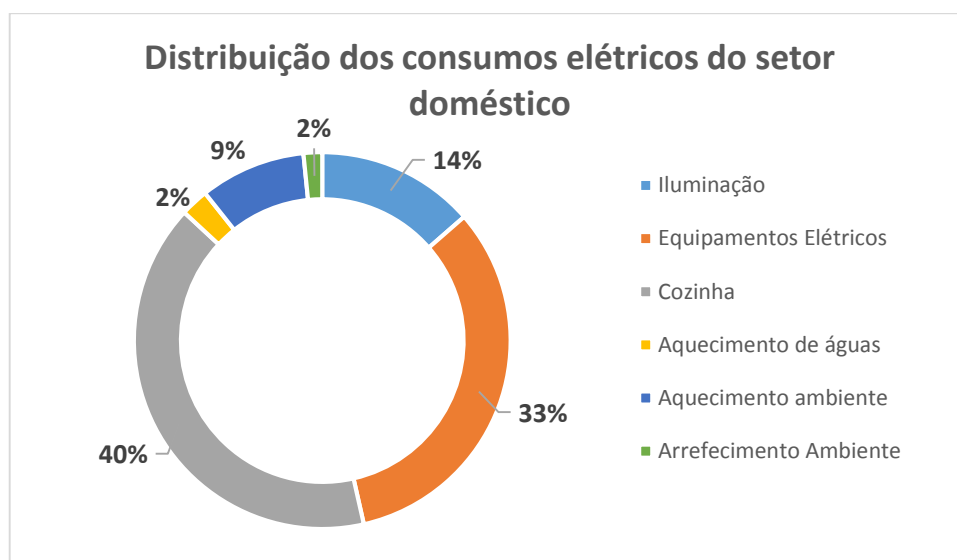


Figura 1: Distribuição do consumo elétrico no setor doméstico (Fonte: (INE & DGEG, 2010))

Atentando à distribuição do consumo elétrico pelos diferentes usos finais no sector doméstico, ilustrados na Figura 1, verifica-se que existem parcelas com maior representatividade, onde devem incidir as medidas de redução de consumo. A climatização, em particular, a energia necessária para aquecimento e arrefecimento das habitações, apesar de corresponder a apenas 11%, pode beneficiar da aplicação de medidas de eficiência energética ou estratégias passivas

que contribuam para uma efetiva redução do consumo de energia nos edifícios. Alternativamente, essas mesmas medidas podem promover melhores condições de conforto ambiente sem acréscimo no consumo de energia elétrica.

Os sistemas de arrefecimento passivo têm por base estratégias que pretendem diminuir a temperatura do ar interior, podendo reduzir ou até mesmo eliminar a necessidade de climatização no decorrer da estação de arrefecimento. Exemplos de técnicas de arrefecimento passivo são a ventilação natural, arrefecimento pelo solo, arrefecimento evaporativo, arrefecimento radiativo (Gonçalves & Graça, 2014).

Em particular, a ventilação natural consiste na movimentação de ar do exterior de um edifício para o seu interior e vice-versa devido a diferenças de pressão e temperatura entre o ar interior e o exterior do edifício (Silva, 2014). Esta técnica contribui não só para o melhoramento da qualidade térmica dos edifícios como também da qualidade do ar interior.

A ventilação natural aplicada durante o período noturno, no decorrer da estação de arrefecimento, permite tirar partido da temperatura do ar exterior, que nesse período é geralmente mais baixa que a temperatura do ar interior, removendo as cargas térmicas concentradas no interior do edifício ao longo do dia. Dependendo da configuração das aberturas existentes no edifício, por exemplo janelas, portas, grelhas, chaminés a ventilação pode ocorrer de forma unilateral ou transversal.

Segundo Santamouris e Kolokotsa (2013), muitos têm sido os autores que ao longo dos anos estudaram estratégias de arrefecimento passivo, em particular de ventilação natural nas habitações avaliando a sua eficácia através de:

- Dados experimentais de ventilação natural em células de teste ou habitações já existentes;
- Desenvolvimento de técnicas de simulação complexas que vão desde de modelos analíticos com base na equação de Bernoulli, modelos da rede de fluxo de ar em várias zonas, a técnicas de *Computational Fluid Dynamics*, *CFD*, entre outros (Santamouris & Kolokotsa, 2013).

No conforto térmico, devido à incerteza associada ao resultado da ação da ventilação natural, Artmann, Manz, e P.Heiselberg (2008) definem que os parâmetros com maior importância para esta estratégia são o fluxo de ar e as condições climáticas, sendo necessário dar especial atenção à capacidade térmica mássica e aos ganhos internos pois têm um impacto significativo na ação do sistema (Artmann, Manz, & P.Heiselberg, 2008).

Segundo Santamouris, Sfakianakin e Pavlou (2010), a ventilação noturna pode resultar em reduções de $12kWh/m^2$ ano e uma diminuição em três graus Celsius do valor máximo de temperatura do ar interior no dia seguinte. Quanto mais elevadas forem as necessidades de energia para arrefecimento maior será o potencial da ventilação noturna (Santamouris, Sfakianaki, & Pavlou, 2010).

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de um método de cálculo simples que possa ser integrado no método quase-estacionário (ISO13790:2007, 2007) e (Normative Proposal ISO/DIS 52010, 2015)) que permita estimar a redução nas necessidades de energia para arrefecimento, utilizando a ventilação como sistema de arrefecimento passivo, mas que dependa apenas das condições climáticas. Pretende-se desenvolver um método que se baseie na parametrização simplificada da habitação e do clima. Para tal, testa-se a introdução de algumas alterações no método PCLR (Nunes & Panão, 2013) por forma a que a sua aplicação seja mais direta e possível de integrar no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH).

Concetualmente, o método PCLR consiste na determinação da redução de energia de arrefecimento através da introdução de um sistema passivo por leitura direta numa curva de correlação aos pontos obtidos previamente por simulação ou experimentação. Nesta dissertação utilizam-se como ferramentas de análise o método horário simplificado e *EnergyPlus*.

Assim, ao longo da dissertação procurar-se-á responder às seguintes questões:

- Com que erro é que a curva de correlação descreve os dados obtidos através dos modelos de simulação realizados?
- Os caudais impostos nas simulações são passíveis de ser verificados?
- É possível garantir uma taxa mínima de referência para as infiltrações com ventilação natural?
- Como é que o perfil de ganhos internos, na regulamentação considerado constante, influencia as necessidades de energia para arrefecimento?
- Os períodos definidos para a ventilação conduzem a uma redução significativa das necessidades de energia para arrefecimento?
- O método horário simplificado traduz com eficácia o efeito da ventilação noturna?

1.3. Estrutura da dissertação

De modo a garantir o cumprimento dos objetivos mencionados, a dissertação organiza-se da seguinte forma:

No Capítulo 2 serão descritos os métodos utilizados para criar os modelos de simulação utilizados na elaboração da dissertação. Em primeiro lugar, é apresentado o método PCLR sendo claro a forma a partir do qual se desenvolveu o método aplicado para a obtenção da curva PCLR. São ainda apresentados os dois modelos utilizados para obter dados para a caracterização do método PCLR. Primeiramente, encontra-se explicitado o método horário simplificado e em seguida a descrição do *software EnergyPlus* que permite a modelação computacional de transferência de calor em edifícios.

No 0 será apresentado o caso de estudo. Nas várias secções constituintes deste capítulo serão descritas as características construtivas e térmicas da habitação, os dados climáticos considerados, os perfis de ganhos internos utilizados, tal como os horários impostos para a realização da simulação.

No Capítulo 4 serão descritos os tipos de ventilação aplicados aos modelos e os parâmetros individuais necessários para a correta simulação de todos os modelos pretendidos. No final, são descritos os parâmetros base necessários para a correta obtenção da curva PCLR.

No Capítulo 5 serão apresentados e analisados os resultados obtidos em cada simulação e por fim será obtida a curva PCLR final.

No 0 será apresentado um caso exemplo de aplicabilidade do método desenvolvido para uma situação real.

No Capítulo 7 serão apresentadas as conclusões tecidas durante o desenvolvimento da dissertação, dando especial foco ao cumprimento dos objetivos ao qual se propôs a presente dissertação.

Capítulo 2 - Métodos

2.1. Método PCLR

2.1.1. Método PCLR Original

Segundo Nunes (2012), o método PCLR (*Passive Cooling Load Ratio*) consiste numa avaliação simplificada da influência do potencial de um sistema de arrefecimento passivo nos valores de necessidades de arrefecimento mensais, não empregando cálculos muito complexos.

Este método depende do tipo de sistema de arrefecimento passivo utilizado e dos dados climáticos do local onde se realiza o estudo.

Inicialmente, foi efetuada uma análise da aplicação e desenvolvimento do método utilizando dois sistemas de arrefecimento passivo com recurso a ventilação: um sistema de tubos enterrados e um sistema combinado de tubos enterrados e chaminé solar.

O método PCLR possui dois parâmetros para caracterizar o sistema de arrefecimento e a sua relação com a diminuição da carga de arrefecimento:

- **PCLR (*Passive Cooling Load Ratio*)** que traduz o rácio entre a energia de ventilação extraída pelo sistema passivo e a carga térmica que tem de ser extraída, composta pelos ganhos solares e os ganhos internos do caso de estudo.

$$PCLR = \frac{Q_{ve}}{Q_{ref}} \quad [ad] \quad [1]$$

- **PCF (*Passive Cooling Fraction*)** que demonstra o efeito que a utilização do sistema de arrefecimento passivo tem nas necessidades de arrefecimento. O parâmetro traduz a redução entre as necessidades de arrefecimento com recurso ao sistema de arrefecimento passivo e a carga térmica que tem de ser extraída.

$$PCF = 1 - \frac{Q_{nd}}{Q_{ref}} \quad [ad] \quad [2]$$

O método original demonstrou uma boa caracterização da ação sistema de arrefecimento apresentando erros médios de 2% a 5% para o sistema de tubos enterrados e de 4% para o sistema combinado. (Nunes A. I., 2012)

2.1.2. Método PLCR Adaptado

Tendo por base o método PCLR previamente desenvolvido com um erro associado inferior a 5% para os sistemas estudados, procedeu-se ao estudo da sua aplicabilidade a outro tipo de sistemas de arrefecimento passivo.

O sistema escolhido trata agora o recurso a ventilação das habitações simplesmente através da abertura de janelas, nos períodos em que a temperatura do ar exterior é favorável. Para um alargamento da aplicabilidade do método consideraram-se algumas alterações no processo de calculo dos índices PCLR e PCF.

Assim sendo o novo PCLR, traduz o rácio entre o potencial de ventilação do sistema, comparando os dados de ventilação na situação com e sem utilização do sistema de arrefecimento e as necessidades de arrefecimento iniciais.

$$PCLR = \frac{\Delta Q_{ve}}{Q_{nd_i}} \quad [ad] \quad [3]$$

Onde:

Q_{nd_i} – necessidades de energia para arrefecimento sem sistema de arrefecimento passivo, [kWh].

ΔQ_{ve} – acréscimo dos ganhos de ventilação com a utilização do sistema de arrefecimento passivo e a situação inicial contemplada apenas por infiltrações, [kWh].

$$\Delta Q_{ve} = Q_{ve,SP} - Q_{ve,i} \quad [kWh] \quad [4]$$

$Q_{ve,SP}$ – ganhos de ventilação com utilização do sistema de arrefecimento passivo, [kWh]

$Q_{ve,i}$ – ganhos de ventilação na situação inicial, [kWh]

Por sua vez, o contributo dos ganhos de ventilação na redução das necessidades de arrefecimento é descrito pelo PCF, caracterizado pelo rácio entre o decréscimo nas necessidades de arrefecimento com a utilização da ventilação pelas necessidades de energia para arrefecimento sem recurso a sistemas de arrefecimento passivo (situação inicial).

$$PCF = \frac{\Delta Q_{nd}}{Q_{nd_i}} \quad [ad] \quad [5]$$

Onde:

ΔQ_{nd} – representa o decréscimo das necessidades de climatização quando se utiliza o sistema de arrefecimento passivo, [kWh].

$$\Delta Q_{nd} = Q_{nd,i} - Q_{nd,SP} \quad [kWh] \quad [6]$$

Em que,

$Q_{nd,SP}$ – necessidades de energia para arrefecimento com a utilização do sistema de arrefecimento passivo, [kWh]

O PCF é definido em função do PCLR. Esta relação depende do sistema de arrefecimento passivo utilizado (Nunes A. I., 2012). A relação entre os dois parâmetros será descrita por uma curva logarítmica do tipo:

$$PCF = a \times \ln(PCLR) + b \quad [ad] \quad [7]$$

Através desta curva será possível quantificar, tendo conhecimento das necessidades de arrefecimento iniciais e o potencial de ventilação, a redução que se conseguirá atingir utilizando a ventilação como sistema de arrefecimento passivo.

2.2. Método Horário Simplificado (Modelo 5R1C)

O método horário simplificado também denominado por modelo 5R1C foi desenvolvido pelo *Centre Scientifique et Technique du Batiment* (CSTB) e encontra-se descrito no documento normativo EN ISO 13790 (Panão, Aula 7, 2013).

O cálculo do modelo baseia-se no balanço de energia entre o interior e exterior do edifício/zona em estudo. Este balanço é calculado através da temperatura de *set-point* a partir da qual é necessário fornecer ou extrair energia do ar interior (ISO13790:2007, 2007). Este método apenas considera o calor sensível excluindo o calor latente.

Este modelo tem por base uma equivalência com um circuito elétrico RC, isto é, uma rede de temperaturas com condutâncias (correspondendo às resistências no circuito elétrico) e uma capacitância térmica mássica do edifício (ISO13790:2007, 2007).

As necessidades de energia útil para aquecimento e arrefecimento calculadas a partir do modelo 5R1C devem ser avaliadas diariamente/mensalmente não sendo efetuada uma análise horária uma vez que os resultados podem conter algum erro associado (ISO13790:2007, 2007).

Para a análise do sistema de arrefecimento passivo a partir deste método considerou-se que o edifício em estudo pode ser analisado como uma única zona térmica possuindo, por esse motivo, uma distribuição uniforme de ganhos solares e de temperatura interior (Panão, Aula 7, 2013).

O Modelo 5R1C pode ser descrito através da rede de condutâncias representada na Figura 2.

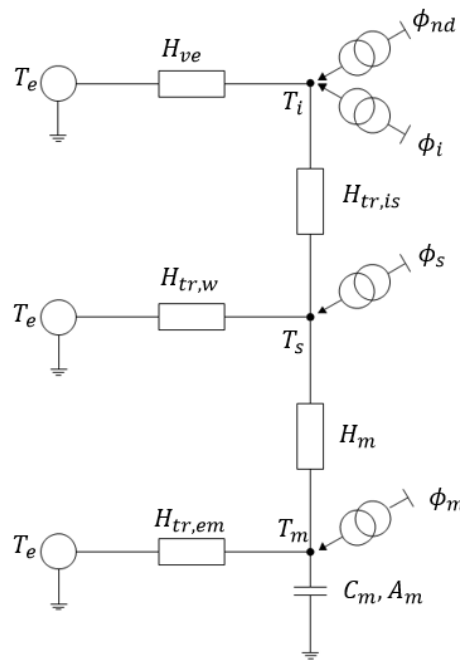


Figura 2: Rede equivalente de acordo com a Norma ISO13790:2007 (Fonte: (ISO13790:2007, 2007))

Onde:

T_e – temperatura exterior, [°C]

T_i – temperatura interior, [°C]

T_s – temperatura estrela, [°C]

T_m – temperatura massa, [°C]

H_{ve} – condutância de Ventilação, [W/K]

$H_{tr,w}$ – condutância dos vãos envidraçados, [W/K]

$H_{tr,em}$ – condutância dos elementos pesados, [W/K]

$H_{tr,is}$ – condutância entre as temperaturas T_s e T_i , [W/K]

H_m – condutância entre as temperaturas T_s e T_m , [W/K]

C_m — capacidade Térmica Mássica, $[J/K]$

A_m — área de massa efetiva, $[m^2]$

ϕ_i — ganhos do nodo T_i , $[W]$

ϕ_s — ganhos do nodo T_s , $[W]$

ϕ_m — ganhos do nodo T_m , $[W]$

ϕ_m — necessidades energéticas de climatização, $[W]$

A metodologia de cálculo detalhado expressa através das equações implementadas para a obtenção dos resultados a partir deste método encontra-se explicitada no Anexo A.

2.3. Modelação computacional de transferência de calor em edifícios

Com o objetivo de obter resultados mais detalhados para o comportamento térmico do edifício em estudo recorreu-se a um *software* de simulação da transferência de calor em edifícios denominado *EnergyPlus* (versão 8.4). Este programa foi desenvolvido pelo *U.S. Department of Energy Building Technologies Office* e tem por base os balanços de energia detalhados em múltiplas zonas térmicas (EnergyPlus, 2015) desenvolvidos em *open-source* permitindo a integração de modelos desenvolvidos por programadores de todo o mundo (Graça, Aula 1, 2015)

Esta ferramenta apresenta um grande rigor na modelação da geometria dos edifícios e na instalação de sistemas AVAC nos modelos. Permite prever temperaturas, cargas térmicas, necessidades energéticas, caudais de ventilação entre muitos outros parâmetros.

Para efetuar a modelação e a parametrização das características do edifício em estudo foi necessário recorrer inicialmente a um *software* desenvolvido pela *Trimble*, o *SketchUp*. Este *software* permite criar o modelo do edifício em 3D e associado com uma extensão *OpenStudio SketchUp Plug-in* torna o modelo criado uma geometria reconhecida pelo *EnergyPlus*. (OpenStudio, 2015)

Após a associação entre *softwares* o *EnergyPlus* fica com a informação base do edifício nomeadamente, dimensão, orientação, condições-fronteira das superfícies e vãos envidraçados.

O *software* possibilita a introdução de um elevado número de variáveis de entrada (*inputs*) dependendo das características do edifício e do objetivo da simulação.

Tendo por base os resultados necessários para a avaliação do método PCLR conclui-se que os dados de *output* pretendidos seriam:

- Temperatura do ar interior;
- Caudal de entrada de ar novo (ou renovações por hora de ar novo);
- Necessidades de energia útil para arrefecimento

O *EnergyPlus* possui diversos objetos que podem ser selecionados dependendo do fim pretendido. Apesar de existirem simulações que consideram diferentes objetos, o conjunto apresentado na Figura 2 inclui os objetos base de todas as simulações efetuadas.

Base da Simulação	Controlo Simulação
	Edifício
	Timestep
	Período de Simulação
	Horários
	Materiais Opacos e Envidraçados
	Construções
	Regras de Geometria
	Superfícies do Edifício
	Vãos
	Ganhos internos
	AVAC

Figura 3: Objetos base para o correto funcionamento e definição da simulação

No Anexo B encontram-se detalhadamente descritos todos os parâmetros assumidos em cada um dos objetos do *software*.

Posteriormente, no Capítulo 4, serão descritos os restantes objetos necessários para a avaliação da utilização do sistema de arrefecimento passivo.

Capítulo 3 - Caso de Estudo

3.1. Edifício

Tendo por base uma habitação existente, criou-se um modelo de um apartamento-tipo que será o objeto de estudo da modelação.

A habitação escolhida, representada na Figura 4, possui $84m^2$ de área de pavimento, $6 \times 14 m$, um pé direito de $2.5m$ e apenas possui duas fachadas em contacto com o exterior, possuindo três vãos envidraçados numa fachada e quatro na outra com área de $1m^2$ ($1 \times 1m$) cada. As restantes fachadas do apartamento, incluindo pavimento e teto, encontram-se em contacto com edifícios adjacentes, que se assumiu estarem nas mesmas condições que a habitação em estudo.



Figura 4: Planta do apartamento

Considerou-se que as fachadas com maior área se encontravam em contacto com o exterior.

3.1.1. Elementos Construtivos

Os elementos construtivos da habitação em estudo, a sua respetiva constituição e área total encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Elementos construtivos e respetiva constituição

Elementos Construtivo	Nome	Espessura [m]	Área Total da Superfície [m ²]
Parede Exterior	Marmorite	0.020	70
	Argamassa	0.015	
	Tijolo	0.110	
	Caixa de Ar	0.130	
	Tijolo	0.110	
	Reboco	0.015	
	Estuque	0.015	
Parede interior ou em contacto com edifício adjacente	Reboco	0.015	35
	Estuque	0.015	
	Tijolo	0.110	

Elementos Construtivo	Nome	Espessura [m]	Área Total da Superfície [m ²]
	Estuque	0.015	
	Reboco	0.015	
Pavimento	Estuque	0.015	84
	Reboco	0.015	
	Laje	0.150	
	Betonilha	0.015	
	Taco	0.022	
Teto	Taco	0.022	84
	Betonilha	0.015	
	Laje	0.150	
	Reboco	0.015	
	Estuque	0.015	
Vãos Envidraçados	Vidro simples	0.004	7

Após a definição da constituição de todos os elementos construtivos do edifício foi necessário caracterizá-los no que diz respeito às propriedades térmicas. Na Tabela 2 encontram-se apresentadas as propriedades térmicas de cada um dos materiais utilizados.

Tabela 2: Propriedades térmicas dos materiais constituintes dos elementos construtivos

Material	Rugosidade	Condutividade Térmica ¹ λ [W/m. °C]	Densidade ¹ ρ [kg/m ³]	Calor Específico ² C_p [J/kg. °C]
Argamassa	Suave	1.30	1900	780
Estuque	Suave	0.30	750	1805
Marmorite	Média Rugosa	3.50	2700	830
Reboco	Médio Suave	1.30	1900	780
Tijolo	Média Rugosa	0.41	2645	835
Betonilha	Média Rugosa	1.30	1800	880
Laje	Média Rugosa	1.80	2300	880
Taco	Média Rugosa	0.14	545	1380
Vidro de Sódico-Calcário	Média Rugosa	1.00	2500	-

3.1.2. Caracterização dos vãos envidraçados

Os vãos envidraçados possuem um fator de correção, o fator solar, que descreve a variação da incidência da radiação solar, dependendo da orientação do vão. Este fator depende da estação do ano em análise.

¹ Os valores apresentados na Tabela 2 de condutividade térmica e de densidade dos materiais foram retirados do documento ITE50 (Santos & Matias, 2006).

² Os valores apresentados na Tabela 2 de calor específico dos materiais foram retirados do livro *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th edition* (Bergman, Lavine, Incropera, & Dewitt, 2011)

Estes elementos na habitação em estudo são constituídos por vidro simples, incolor com 4mm de espessura, do tipo sódico-calcário e não possuem qualquer tipo de dispositivo de proteção solar.

O fator solar do vidro aplicado ao vão envidraçado para uma radiação solar incidente perpendicular à superfície do vidro encontra-se tabelado no Despacho n.º 15793-K/2013 toma o valor de:

$$g_{\perp,vi} = 0.88$$

Relativamente, à fração envidraçada como possuem uma caixilharia em madeira toma o valor de:

$$F_g = 0.65$$

Para o cálculo das necessidades nominais de energia para arrefecimento, a redução dos ganhos solares causada pela variação do ângulo de incidência da radiação solar é descrita pelo fator de correção da seletividade angular dos envidraçados, este fator depende da orientação da janela. Segundo o descrito no Despacho n.º 15793-K/2013 os valores para as várias orientações é de:

Tabela 3: Fator de correção da seletividade angular dos envidraçados (Adaptado: Despacho n.º 15793-K/2013)

Orientação	Norte	Sul	Este/Oeste
$F_{w,v}$	0.85	0.80	0.90

O fator solar para a estação de arrefecimento é obtido através da seguinte equação:

$$g_v = g_{\perp,vi} \times F_{w,v} \quad [ad] \quad [8]$$

Na Tabela 4 encontram-se os fatores solares para os diferentes vãos do caso de estudo:

Tabela 4: Fator solar dos vãos envidraçados do caso de estudo

Orientação	$g_{\perp,vi}$	$F_{w,v}$	g_v
Norte	0.88	0.85	0.75
Sul	0.88	0.8	0.70
Este/ Oeste	0.88	0.9	0.79

As características específicas deste tipo de vidro foram obtidas a partir da biblioteca de vidros do software *Window 6.3* (Berkeley Lab WINDOW, 2015):

Tabela 5: Característica óticas do vidro

Características do vidro		
Solar	Transmissividade <i>Front</i>	0.847
	Transmissividade <i>Back</i>	0.847
	Refletividade <i>Front</i>	0.078
	Refletividade <i>Back</i>	0.078
Visível	Transmissividade <i>Front</i>	0.902
	Transmissividade <i>Back</i>	0.902

Características do vidro		
Infravermelho	Refletividade <i>Front</i>	0.081
	Refletividade <i>Back</i>	0.081
	Transmissividade	0
	Emissividade <i>Front</i>	0.84
	Emissividade <i>Back</i>	0.84

3.1.3. Coeficiente global de transferência de calor por transmissão

Em seguida, foi necessário efetuar o cálculo do coeficiente global de transferência de calor por transmissão tendo em consideração o que está enunciado no Despacho n.º 15793-K/2013.

Este coeficiente está relacionado com a energia que é transferida através de toda a envolvente do edifício e o seu cálculo depende da estação do ano.

Como este estudo incide sobre a estação de arrefecimento, o coeficiente é calculado pela seguinte expressão:

$$H_{tr,v} = H_{ext} + H_{enu} + H_{ecs} \quad [W/^{\circ}C] \quad [9]$$

Onde:

H_{ext} – coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o exterior, $[W/^{\circ}C]$

H_{enu} – coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com espaços não úteis, $[W/^{\circ}C]$

H_{ecs} – coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o solo, $[W/^{\circ}C]$

Dado que a habitação em estudo apenas se encontra em contacto com o exterior e com edifícios adjacentes nas mesmas condições, o coeficiente global de calor por transmissão será dado apenas pelo coeficiente de transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o exterior.

$$H_{tr,v} = H_{ext} \quad [W/^{\circ}C] \quad [10]$$

Através da equação [11] é possível calcular o coeficiente de transferência de calor através da envolvente:

$$H_{ext} = \sum_i [U_i \times A_i] + \sum_j [\psi_j \times B_j] \quad [W/^{\circ}C] \quad [11]$$

Em que,

U_i - coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento i da envolvente, $[W/m^2/^{\circ}C]$

A_i - área do elemento i da envolvente medida pelo interior do edifício, $[m^2]$

ψ_j - coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear j, $[W/m/^{\circ}C]$

B_j - desenvolvimento linear da ponte térmica linear j medido pelo interior, $[m]$

Para efeitos de simplificação dos cálculos não se considerou o coeficiente de transmissão térmica linear dos diversos elementos. Esta simplificação foi assumida em todas as ferramentas de cálculo utilizadas.

Separou-se o processamento do cálculo do coeficiente de transmissão térmica superficial para as diferentes superfícies constituintes do edifício em:

- Elementos Opacos

O valor do coeficiente de transmissão térmica superficial opaco é dado por:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_k R_k + R_{se}} \quad [W/m^2\text{°C}] \quad [12]$$

Onde:

R_{si} – resistência térmica superficial interior, [$m^2\text{°C}/W$]

R_k – resistência térmica da camada k, [$m^2\text{°C}/W$]

R_{se} – resistência térmica superficial exterior, [$m^2\text{°C}/W$]

As resistências térmicas superficiais interior e exterior encontram-se tabeladas no documento publicado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ITE50, e encontra-se resumidas na seguinte tabela:

Tabela 6: Resistências térmicas superficiais (Adaptado: (Santos & Matias, 2006))

Sentido do fluxo de calor	Resistências Térmica Superficiais [$m^2\text{°C}/W$]	
	R_{se} , Exterior	R_{si} , Interior
Horizontal	0.04	0.13

Por outro lado, as resistências térmicas das camadas de cada parede são calculadas através da seguinte equação:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad [m^2\text{°C}/W] \quad [13]$$

Onde:

e – espessura do material, [m]

λ – condutividade térmica do material, [$W/m\text{°C}$]

A parede exterior possui uma caixa-de-ar com uma espessura de 13mm. O valor considerado para a resistência de ar desta camada, pelo Anexo I do documento ITE50 (Santos & Matias, 2006) toma o valor de:

$$R_{ar} = 0.16 \text{ } m^2\text{°C}/W$$

Considerando os dados apresentados na Tabela 2 e as resistências térmicas da caixa-de-ar e superficiais tabeladas, obteve-se o coeficiente de transmissão térmica para a parede exterior da habitação.

$$U_{opaco} = 1.05 \text{ } W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Considerando o valor de área total da superfície Tabela 2 que se encontra em contacto com o exterior, calculou-se o coeficiente de transferência de calor da envolvente opaca:

$$H_{tr,opaco} = 66.4 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

- Elementos Envidraçados

O coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados foi obtido a partir do ITE50.

Considerou-se que os vãos envidraçados eram do tipo simples, com um único vidro, caixilharia de madeira e giratória. O coeficiente de transmissão térmica correspondente, segundo o documento ITE50 Anexo III (Santos & Matias, 2006), toma o valor de:

$$U_w = 5.1 \text{ W/m}^2\text{}^{\circ}\text{C}$$

Assim sendo, o coeficiente de transferência de calor pelos vãos envidraçados toma o valor:

$$H_{tr,w} = 35.7 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

Recorrendo à equação [9] o coeficiente global de calor por transmissão é:

$$H_{tr,v} = 102.1 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

3.1.4. Capacidade Térmica Mássica

Um parâmetro importante a definir para o modelo 5R1C é a capacidade térmica mássica do edifício que determina a variação da energia térmica de um elemento construtivo quando recebe calor. Quanto maior o valor deste parâmetro, maior será a resistência à variação de temperatura, ou seja, maior a inércia térmica do elemento. Associado a este parâmetro encontra-se a área de massa efetiva que consiste na área de superfície em contacto com o volume interior que possuem elementos que contribuem para a inércia térmica do edifício.

Atentando ao descrito na Norma ISO 13790:2007 considerou-se a tabela que descreve o método de cálculo, para o método horário simplificado, de ambos os parâmetros.

Tabela 7: Valores por defeito dos parâmetros dinâmicos para o Modelo Horário Simplificado (Adaptado: (ISO13790:2007, 2007))

Classe de Inércia	Área de massa efetiva, $A_m [\text{m}^2]$	Capacidade Térmica Mássica, $C_m [\text{J/K}]$
1	$2.5 \times A_{pav}$	$80\,000 \times A_{pav}$
2	$2.5 \times A_{pav}$	$110\,000 \times A_{pav}$
3	$2.5 \times A_{pav}$	$165\,000 \times A_{pav}$
4	$3.0 \times A_{pav}$	$260\,000 \times A_{pav}$
5	$3.5 \times A_{pav}$	$370\,000 \times A_{pav}$

Utilizando a equação [14] presente na norma calculou-se a capacidade térmica mássica

$$C_m = \sum_i C p_i \times \rho_i \times e_i \times A_{s_i} \quad [J/K] \quad [14]$$

Em que,

$C p_i$, Calor específico do material i, $[J/K.m^2]$

ρ_i , densidade do material i, $[kg/m^3]$

e_i , espessura do material i, $[m]$

A_{s_i} , área do elemento i, $[m^2]$

Para efeitos de cálculo, o máximo de espessura considerado para a capacidade térmica mássica de um elemento construtivo é medido desde o interior, 0,1 m.

Tendo por base as propriedades e características apresentadas na Tabela 1 e Tabela 2 a capacidade térmica mássica para a habitação em estudo é:

$$C_m = 4.89 \times 10^7 J/K$$

Para efeitos de cálculo para o método horário simplificado optou-se por utilizar os dados presentes na norma. Devido ao valor elevado da capacidade térmica mássica considerou-se a classe de inércia para o edifício em estudo é muito elevada.

Atentando às equações presentes na Tabela 7, os valores de área de massa efetiva e capacidade térmica mássica calculados para este caso de estudo são:

$$C_m = 3.11 \times 10^7 J/K$$

$$A_m = 294 m^2$$

3.2. Dados Climáticos

Como já foi referido anteriormente um dos objetivos da dissertação é a criação de um modelo que dependa maioritariamente das condições climáticas do local onde se encontra o caso de estudo. Deste modo, procedeu-se à simulação dos vários modelos em 5 zonas distintas de Portugal continental, onde os dados climáticos tomam valores diferentes entre si.

Na Tabela 8 encontram-se os concelhos considerados para o qual se associou um ficheiro com os dados climáticos de um ano típico, obtidos a partir do CLIMAS-SCE – *Software* para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios criado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia, LNEG (LNEG, 2014).

Tabela 8: Coordenadas geográficas dos locais pretendidos para efetuar simulação

Concelhos	Latitude	Longitude	Altitude Referência [m]	Fuso-Horário
Beja	37.9°N	7.9°O	178	0
Bragança	41.6°N	7.1°O	680	0
Castelo Branco	39.9°N	7.3°O	328	0

Concelhos	Latitude	Longitude	Altitude Referência [m]	Fuso-Horário
Faro	37.3°N	8.0°O	145	0
Lisboa	38.9°N	9.2°O	109	0

Os ficheiros obtidos possuem os dados de temperatura do ar exterior, humidade relativa, velocidade e direção do vento, radiação solar global e difusa total e radiação solar nas oito orientações verticais (N, S, E, O, NE, NO, SE, SO).

Após a definição de todas as características base relevantes do edifício foi necessário proceder à distribuição dos ganhos internos na habitação tal como os horários praticados.

3.3. Ganhos Internos

Os ganhos internos traduzem a dissipação de calor do metabolismo dos ocupantes e/ou calor dos equipamentos que se encontram no interior do espaço como iluminação, equipamentos elétricos, entre outros (Panão, Aula 6, 2013).

Para contabilizar os ganhos internos do caso de estudo consideraram-se dois tipos de distribuição de ganhos internos:

- Perfil de ganhos internos constante

Os ganhos internos constantes consistem num valor médio constante ao longo de todo o dia.

Neste perfil, ao longo do dia, considerou-se que se dissipava em média $4W/m^2$ (Despacho n.º 15793-I/2013, (Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013)) perfazendo uma dissipação diária de calor de $96 Wh/m^2$.

- Perfil de ganhos internos variável

Segundo (Pombeiro, Pina, & Silva), tendo por base os dispêndios diários de 22 famílias, o consumo médio diário é descrito pelo perfil apresentado no Gráfico 1. O valor diário de consumo toma o valor de $10,7kWh$.

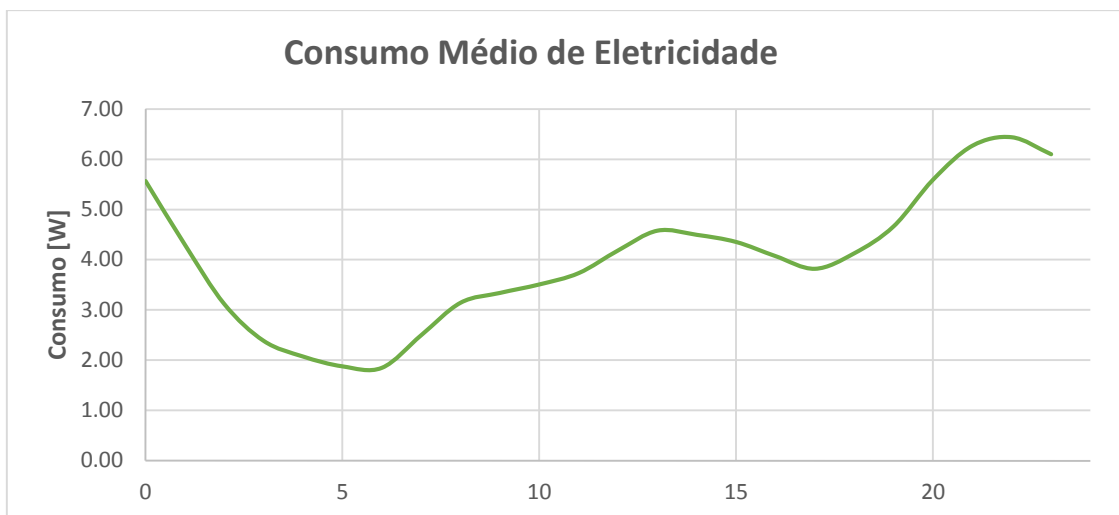


Gráfico 1: Perfil de consumo elétrico médio (Adaptado: (Pombeiro, Pina, & Silva))

Assim sendo o comportamento considerado para o perfil de ganhos internos equipara-se ao apresentado no Gráfico 1 uma vez que, descreve os consumos energéticos de uma habitação considerando a ocupação e a distribuição do consumo de energia ao longo do dia sendo o período noturno o que apresenta um maior valor.

Para os perfis de ganhos internos serem equiparáveis entre si procedeu-se à manipulação dos dados de ganhos internos apresentados por (Pombeiro, Pina, & Silva). O valor de fluxo de calor do perfil variável para a área de pavimento da habitação em estudo toma o valor total diário de, aproximadamente, $128Wh/m^2$. Deste modo, mantendo-se a distribuição do perfil efetuou-se uma proporção para que o valor diário se mantivesse o mesmo nas duas situações. No Gráfico 2, encontram-se apresentados os valores da dissipação de calor dos dois perfis de ganhos internos.

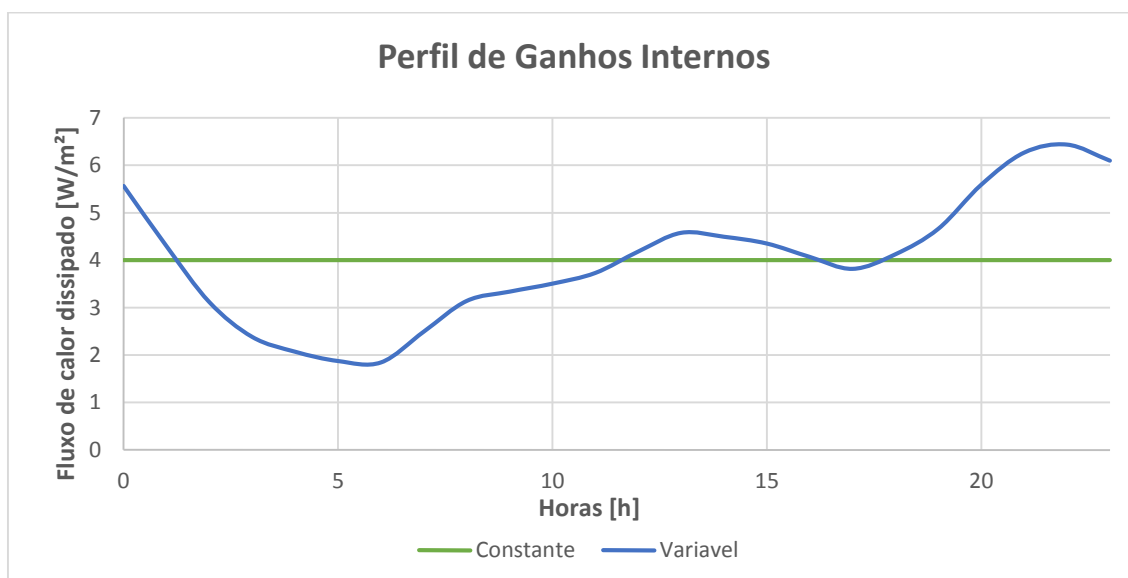


Gráfico 2: Perfil de ganhos internos

Os dois perfis de ganhos internos estabelecidos serão utilizados para todos os dias da estação de arrefecimento não existindo diferenciação entre dias de semana, fim-de-semana e dias festivos.

3.4. Horários

Os horários que necessitam de definição correspondem à distribuição do período com e sem utilização da ventilação.

Assim sendo, durante o período diurno das 08h às 20h apenas existe infiltração. No período noturno recorre-se ao sistema de arrefecimento passivo para remoção de carga térmica e diminuição da temperatura do ar interior.

Relativamente aos *set-points* de temperatura para abertura das janelas, durante o período noturno, definiu-se que apenas abriam quando a temperatura do ar exterior for inferior:

- À temperatura do ar interior;
- A 22°C.

Optou-se por definir uma temperatura de ar exterior limite de 22°C porque se considerou que o efeito do sistema de arrefecimento passivo teria um efeito significativo quando a diferença entre a temperatura do ar exterior e a de referência fosse de 3°C.

Foi necessário definir um *set-point* de temperatura do ar para o sistema de climatização entrar em funcionamento. Segundo Portaria n.º 349-B/2013, as necessidades de energia para arrefecimento das habitações são avaliadas para uma temperatura do ar interior de 25°C (Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013).

Não se limitou uma temperatura mínima de admissão de ar uma vez que o objetivo é p de avaliar o potencial total da ventilação na redução das necessidades de arrefecimento.

Capítulo 4 - Aplicação dos métodos ao sistema de arrefecimento passivo

O sistema de arrefecimento passivo para o qual foi considerada a aplicação do método PCLR foi a ventilação a ser promovida nos períodos em que o ar exterior se encontra a uma temperatura inferior ao ar interior, o que ocorre com maior frequência durante o período noturno.

No decorrer do trabalho avaliaram-se duas formas possíveis de ventilação:

- A ventilação através de um caudal imposto expresso em valores fixos para a taxa de renovação do ar da habitação. A ventilação com caudal imposto foi definida tendo por base estudo efetuado por (Santamouris, Sfakianaki, & Pavlou, 2010) em 240 edifícios residenciais concluindo que as renovações de ar em 50% das habitações eram inferiores a 5RPH, sendo este valor o que apresentava mais ocorrência, e apenas 30% acima de 10RPH. Deste modo, considerou-se três níveis de renovações de ar novo para o apartamento de 2, 5 e 10 RPH. Esta imposição foi praticada apenas no período noturno das 20h às 08h. Durante o período diurno impôs-se uma infiltração constante de 0.6RPH, valor de referência mínimo para a estação de arrefecimento segundo o descrito no Despacho n.º 15793-K/2013.
- A ventilação que resulta do fluxo de ar controlado exclusivamente através da abertura e fecho de janelas. No período noturno abriram-se totalmente as janelas e durante o dia as infiltrações consistiam no fluxo do ar que entrava a partir das fendas das paredes e janelas. Neste processo dividiu-se o apartamento em duas zonas térmicas distintas separadas com uma parede com porta. Durante todo o processo a porta encontrou-se aberta para promover a ventilação entre zonas, permitindo o varrimento de toda a área e consequente aumento da eficácia do processo.

Para efetuar a análise comparativa da redução das necessidades de arrefecimento através da utilização da ventilação considerou-se, em ambas as situações, que para a situação inicial apenas existiam infiltrações durante todo o dia.

De notar que para os modelos criados pelos diferentes métodos consideraram-se duas disposições diferentes para o edifício. A primeira em que as fachadas em contacto com o exterior estão orientadas a norte e sul (Orientação N-S) e uma segunda disposição em que se efetuou uma rotação de 90° do edifício passando as fachadas em contacto com o exterior estarem orientadas a este e oeste (Orientação E-O), respetivamente.

4.1. Método Horário Simplificado (Modelo 5R1C)

O modelo 5R1C foi aplicado, unicamente, à situação em que a ventilação ocorre com imposição do caudal, na medida em o modelo não permite a segunda opção de ventilação.

Tendo por base o descrito na Norma ISO 13790:2007, na Figura 5 encontram-se apresentadas as redes térmicas consideradas para o caso de estudo. A Figura 5 (a) representa a rede térmica da situação inicial e a Figura 5 (b) a rede térmica com a utilização do sistema de arrefecimento passivo considerando quer as infiltrações quer a ventilação.

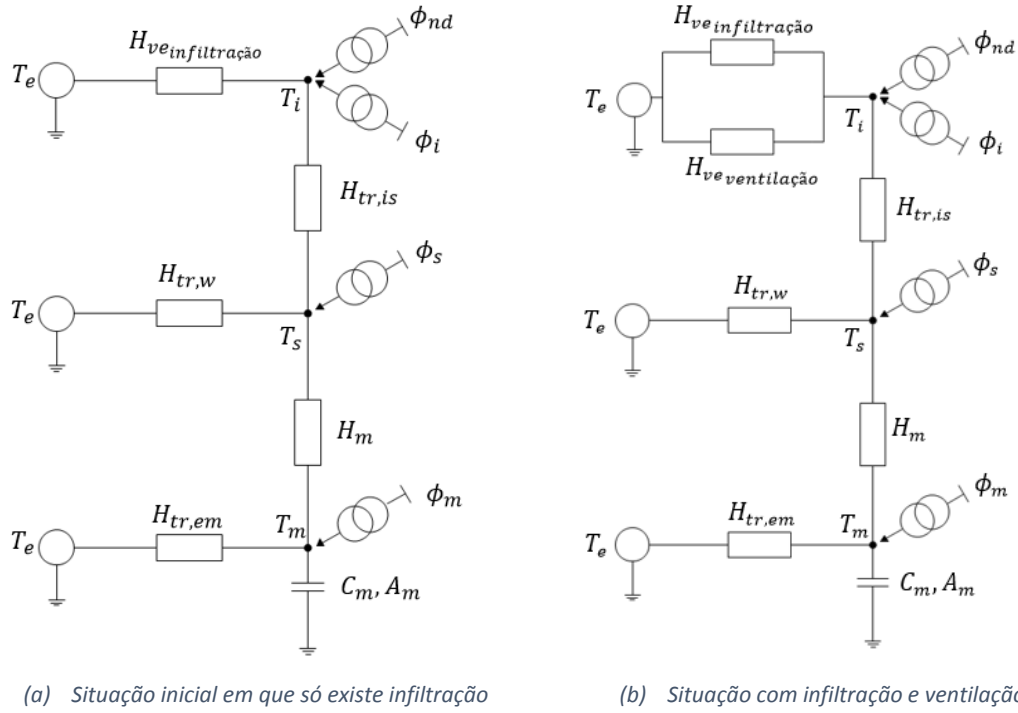


Figura 5: Redes térmicas do caso de estudo

As redes térmicas apresentadas são equivalentes à rede térmica da Norma, apresentada na Figura 2, tomando:

Na primeira situação, $H_{ve} = H_{ve\text{infiltração}}$

Na segunda situação, através da equivalência, $H_{ve} = H_{ve\text{infiltração}} + H_{ve\text{ventilação}}$

Para a resolução do modelo consideraram-se os *inputs* apresentados na seguinte tabela:

Tabela 9: Parâmetros input modelo 5R1C

Parâmetros			
Área total das superfícies em contacto com o volume interior	A_t	378	m^2
Área de pavimento	A_{pav}	84	m^2
Volume interior	V_t	210	m^3
Área de massa efetiva	A_m	294	m^2
Capacitância térmica	C_m	3.11×10^7	J/K
Condutância dos vãos envidraçados	$H_{tr,w}$	35.7	W/K
Condutância da envolvente opaca	$H_{tr,opaco}$	66.4	W/K

Parâmetros			
Condutância entre as temperaturas T_m e T_i	H_m	3439.8	W/K
Condutância entre as temperaturas T_s e T_i	$H_{tr,is}$	1304.1	W/K
Condutância entre as temperaturas T_e e T_m	$H_{tr,em}$	68.3	W/K
Fator relativo à distribuição do fluxo de calor no nodo T_s	P_{rs}	0.21	[ad]
Fator relativo à distribuição do fluxo de calor no nodo T_m	P_{rm}	0.78	[ad]

4.2. Modelação computacional de transferência de energia em edifícios

Relativamente aos modelos efetuados em *EnergyPlus* procedeu-se à simulação dos dois tipos de ventilação.

4.2.1.1. Ventilação com caudal imposto

Em primeiro lugar, simulou-se, analogamente ao modelo 5R1C, a ventilação em que o caudal era imposto mecanicamente sem qualquer tipo de consumo de energia e a uma única zona térmica.

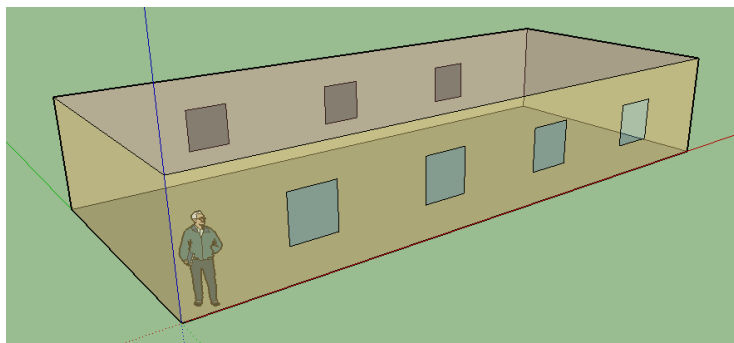


Figura 6: Habitação utilizada para a simulação de ventilação com caudal imposto construída no software SketchUp

Neste processo adicionou-se, à simulação base descrita na Figura 3, os seguintes objetos que permitem a modelação do caudal pretendido:

Zona (Zone)

Este objeto caracteriza as zonas térmicas existentes no modelo, respetivas dimensões entre outros parâmetros. Os valores de altura do teto e volume são calculados pelo *software* automaticamente (Graça, Aula 2, 2015).

As características assumidas constituem os valores por defeito fornecidas pelo *software SketchUp*.

Para o modelo efetuado apenas existe uma zona térmica.

Infiltração (Zone Infiltration: Design Flow Rate)

A infiltração consiste no fluxo de ar que entra, não intencionalmente no edifício proveniente do exterior, para a zona térmica por fendas das janelas ou da envolvente do edifício. A equação base para o cálculo deste parâmetro é dada pela seguinte equação (EnergyPlusTM, 2015).

$$\text{Infiltração} = I_{design} \times F_{schedule} \times [A + B \times |T_{zone} - T_{odb}| + C \times WindSpeed + D \times WindSpeed^2] \quad [RPH] \quad [15]$$

Onde,

I_{design} – taxa de renovação do ar interior, [RPH]

$F_{schedule}$ – horário imposto para cada período do dia, [ad]

T_{zone} – temperatura interior da zona, [°C]

T_{odb} – temperatura exterior, [°C]

$WindSpeed$ – velocidade do vento, [m/s]

Para a simulação efetuada considerou-se que as variáveis A, B, C e D tomam valores de 1,0,0,0 respetivamente. Sendo dependente apenas das infiltrações máximas definidas e do horário que lhe está associado. Deste modo o caudal é constante perante todas as condições (EnergyPlusTM, 2015).

Com esta tipologia, a simulação efetuada aproxima-se do que foi simulado no modelo 5R1C.

Neste objeto, considerou-se que a infiltração se encontrava sempre em funcionamento e que o fluxo de ar seria de 0.6 RPH.

Ventilação (Zone Ventilation: Design Flow Rate)

A ventilação consiste na admissão de fluxo de ar originário do exterior numa zona térmica, com o intuito de efetuar arrefecimento sem recurso a equipamentos mecânicos e consequentemente sem consumo de energia elétrica. Este objeto caracteriza de forma muito simplificada o efeito da ventilação numa zona térmica, sendo descrita pela mesma equação que a infiltração [15].

Tal como no objeto que define a infiltração os coeficientes assumidos para a ventilação foram analogamente, 1,0,0,0 (EnergyPlusTM, 2015).

Relativamente aos parâmetros definidos neste objeto, considerou-se que o fluxo de ar seria mais uma vez definido pelas renovações por hora atuando apenas no período noturno. Considerou-se que o tipo de ventilação considerado no *software* seria ventilação natural, uma vez que, com este parâmetro o *EnergyPlus* assume que o fluxo de ar provém de aberturas nas fachadas dos edifícios, janelas e fendas, não consumindo o ventilador qualquer tipo de energia (EnergyPlusTM, 2015).

Neste objeto também foi possível definir o intervalo de funcionamento do ventilador, este apenas entra em funcionamento quando a temperatura exterior é inferior a 22°C e nunca funciona quando a temperatura de ar interior for superior a 25°C, evitando deste modo conflitos

com o sistema AVAC. Os restantes parâmetros foram definidos de forma a não influenciar o funcionamento do ventilador.

Outputs (Output Variable)

As variáveis necessárias para a correta avaliação do sistema de arrefecimento passivo são:

- Temperatura do ar exterior [°C]
- Temperatura do ar interior [°C]
- Infiltração [RPH]
- Ventilação [RPH]
- Necessidades de energia útil para arrefecimento [J]

4.2.1.2. Ventilação natural entre zonas

Em segundo lugar, efetuou-se uma simulação recorrendo exclusivamente à ventilação natural. Como já foi referido anteriormente nesta simulação optou-se pela modelação de duas zonas térmicas para que o fluxo de ar possa circular entre divisões.

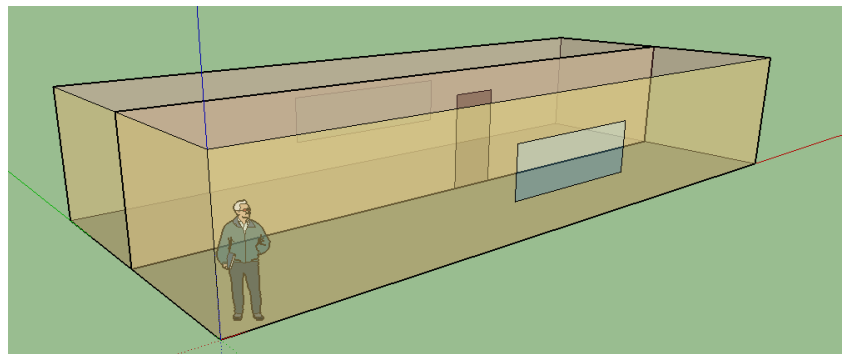


Figura 7: Habitação utilizada para a simulação de ventilação natural entre zonas construída no software SketchUp

Nesta situação as infiltrações ocorrem devido à entrada de ar pelas fendas das janelas e paredes e a ventilação ocorre através da abertura das janelas. O caudal admitido apenas é controlado através da área de abertura das janelas da divisão.

Com o intuito de simplificar a simulação, colocou-se uma janela em cada fachada com a área total dos vãos considerados anteriormente, ou seja, a fachada a norte possui 3 m² e a fachada a sul 4m², para a orientação N-S.

A porta entre divisões encontra-se sempre aberta não causando qualquer tipo de obstrução à passagem de ar. Neste modelo não é, porém, garantido o fluxo unidirecional.

O perfil de ganhos internos para o apartamento em estudo mantém-se constante tendo-se dividido os ganhos internos equitativamente pelas duas zonas térmicas.

Assim sendo, para efetuar esta simulação foi necessário modelar uma rede de fluxo de ar, utilizando o modelo *Airflow Network*, que permite modelar o fluxo de ar proveniente de ventilação natural e forçada em edifícios com várias zonas térmicas, o que não era permitido efetuar com o objeto *zone ventilation* (EnergyPlusTM, 2015).

O modelo possui inúmeros objetos para modelar o sistema de ventilação pretendido, para além dos definidos como base na Figura 3. Como o foco desta simulação é um sistema de ventilação natural, os objetos necessários para uma correta modelação são:

Controlo da Simulação (*Simulation Control*)

Este objeto define os parâmetros básicos para que a simulação ocorra. Permite a introdução de dados para o cálculo quer do fluxo de ar quer dos coeficientes de pressão.

Considerou-se que o controlo do fluxo de ar era efetuado durante todo o período de simulação tendo sem ser modelado o sistema de distribuição de ar (*Multizone without distribution*) (EnergyPlusTM, 2015).

A correta definição dos coeficientes de pressão é extremamente importante para uma situação em que a base do estudo é a ventilação natural. Deste modo como o edifício é retangular e não possui uma localização precisa não existindo assim informação detalhada, por exemplo dos obstáculos que se encontram ao redor do edifício, selecionou-se a opção de cálculo automático dos coeficientes de pressão por parte do *software*.

A tipologia do edifício é baixa (*Low Rise*).

Como se considerou que o *software* procede ao cálculo dos coeficientes de pressão médios é necessário introduzir dois parâmetros para garantir que os dados calculados coincidem com a realidade do edifício. Assim sendo, foi necessário contabilizar o ângulo que o eixo do comprimento do edifício faz com o Norte, como se pode observar na Figura 8, e o rácio entre o comprimento e a largura do edifício. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 10.

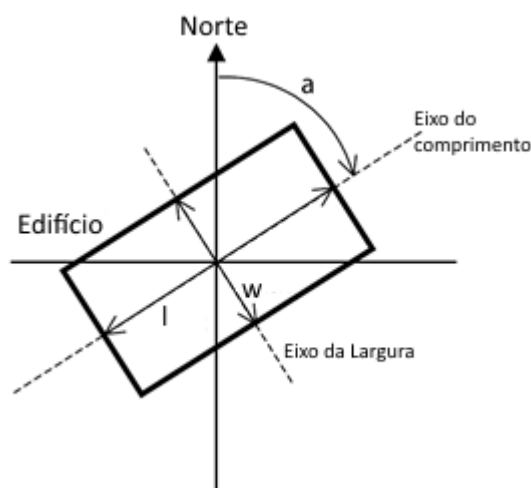


Figura 8: Esquema do edifício com as variáveis necessárias para o cálculo por parte do *software* dos coeficientes de pressão do vento (Adaptado: (EnergyPlusTM, 2015))

Os restantes parâmetros foram assumidos por defeito pelo *software*.

Zona (*Multizone: Zone*)

Este objeto caracteriza o controlo de ventilação em todas as janelas e portas existentes na zona térmica.

O controlo foi efetuado através da temperatura. Deste modo, garantiu-se que a ventilação só funcionava quando a temperatura do ar exterior fosse inferior à do ar interior. Associado a este horário definiu-se que só podia funcionar no período das 20h às 8h. Não se considerou nenhum controlo de ventilação pela ocupação e os restantes parâmetros de controlo de temperatura não foram considerados.

O fator de abertura mínimo foi de 0.

Estes parâmetros foram assumidos para ambas as zonas térmicas.

Superfícies (*Multizone: Surface*)

Os parâmetros constituintes deste objeto qualificam as aberturas existentes no edifício em estudo. Definiu-se deste modo, as fendas das paredes, as janelas e a porta.

As fendas consideradas, como seria de esperar, encontram-se sempre abertas sendo a operação da ventilação constante ao longo de todo o dia.

A porta que liga as zonas térmicas encontra-se sempre aberta permitindo a total circulação do fluxo de ar.

Por fim, as janelas possuem um controlo de temperatura definido através da temperatura de *set-point* e do período em que é favorável a abertura das mesmas. Deste modo, e devido à incapacidade do *software* de efetuar o controlo da abertura através da temperatura do ar exterior, efetuou-se um horário em que a ventilação só poderia ocorrer caso a temperatura exterior fosse inferior a 22°C. Este horário foi elaborado para cada clima a partir do respetivo ficheiro e introduzido posteriormente no *EnergyPlus*.

Condições de referência das fendas (*Multizone: Reference Crack Condition*)

As condições de referência encontram-se relacionadas com as condições perante as quais o fluxo de ar foi definido e encontram-se na Tabela 10.

Fendas (*Multizone: Surface: Crack*)

Este objeto determina o caudal mássico de ar que atravessa as fendas existentes nas fachadas. Os valores considerados encontram-se apresentados na Tabela 10.

Caracterização das aberturas (*Multizone: Component: Detailed Opening*)

No modelo em estudo existem, como já foi referido, dois tipos de aberturas: a porta e as janelas.

Neste objeto é possível definir para a situação em que as aberturas estão fechadas os valores de caudal mássico existente e respetivo expoente.

Em seguida, calcularam-se os fatores de abertura de cada elemento. Para este parâmetro contabilizaram-se apenas dois fatores de abertura quando os elementos se encontravam totalmente abertos ou fechados, 1 e 0 respetivamente. Foi deste modo necessário proceder ao cálculo do fator de largura, altura e altura inicial, bem como definir o coeficiente de descarga em cada fator de abertura.

Os fatores de largura, altura e altura inicial foram obtidos tendo por base a Figura 9 e as equações [16], [17], [18], respetivamente.

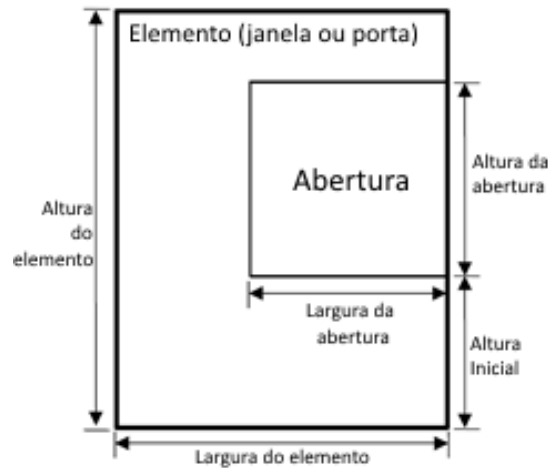


Figura 9: Variáveis necessárias para o cálculo dos fatores de largura, altura e altura inicial (Adaptado: (EnergyPlusTM, 2015))

$$f_{largura} = \frac{w_{abertura}}{w_{elemento}} \quad [ad] \quad [16]$$

$$f_{altura} = \frac{h_{abertura}}{h_{elemento}} \quad [ad] \quad [17]$$

$$f_{altura\ inicial} = \frac{hi_{abertura}}{hi_{elemento}} \quad [ad] \quad [18]$$

Em que,

$w_{abertura}$ — largura da abertura, [m]

$w_{elemento}$ — largura da janela ou porta, [m]

$h_{abertura}$ — altura da abertura, [m]

$h_{elemento}$ — altura da janela ou porta, [m]

$hi_{abertura}$ — altura inicial da abertura, [m]

$hi_{elemento}$ — altura inicial da janela ou porta, [m]

Os valores considerados para ambas as situações encontram-se expostos na Tabela 10.

O coeficiente de descarga considerado para as janelas foi de 0.6, segundo (Pinto, Silva, & Freitas, 2005) e para as portas de 1 uma vez que não tem qualquer tipo de obstrução.

Zona (Zone)

Assumiu-se o mesmo objeto já considerado na simulação anterior alterando o facto de nesta situação existirem duas zonas térmicas.

Outputs (Output Variable)

Para a correta avaliação da influência da ventilação natural foi necessário extrair do *EnergyPlus* as seguintes variáveis para obter uma análise detalhada do modelo:

- Temperatura do ar exterior [$^{\circ}\text{C}$]
- Temperatura do ar interior de ambas as zonas térmicas [$^{\circ}\text{C}$]
- Caudal volúmico de entradas nas zonas térmicas [m^3/s]
- Necessidades de energia útil para arrefecimento [J]

Em suma as variáveis consideradas ao longo dos objetos encontram-se sintetizadas na Tabela 10:

Tabela 10: Parâmetros input simulação ventilação natural entre zonas

Objeto	Parâmetro			
Controlo da Simulação	Comprimento do edifício	l	14	[m]
	Largura do edifício	w	6	[m]
	Ângulo de azimuth entre o Norte e o eixo longitudinal do edifício	a_{NS}	90	[$^{\circ}$]
		a_{EO}	180	[$^{\circ}$]
	Rácio entre comprimento e largura do edifício	r	0.43	[ad]
Condições de Referência	Temperatura de Referência	T_{ref}	20	[$^{\circ}\text{C}$]
	Pressão de Referência	P_{ref}	101325	[Pa]
	Humidade absoluta de referência	H_{ref}	0	[kg_w/kg_a]
Características da abertura	Fator de largura para a janela totalmente fechada	$f_{largura_0}$	0	[ad]
	Fator de altura para a janela totalmente fechada	f_{altura_0}	0	[ad]
	Fator de altura inicial para a janela totalmente fechada	$f_{altura\ inicial_0}$	0	[ad]
	Fator de altura para a janela totalmente aberta	$f_{largura_1}$	1	[ad]
	Fator de altura para a janela totalmente aberta	f_{altura_1}	1	[ad]

Objeto	Parâmetro			
	Fator de altura para a janela totalmente aberta	$f_{altura\ inicial_1}$	1	[ad]
	Coeficiente de descarga da janela	Cd_{janela}	0.6	[ad]
	Coeficiente de descarga da porta	Cd_{porta}	1	[ad]

4.3. Método PCLR

Como já foi referido no Capítulo 2 na secção 2.1.2. o cálculo ambos os índices PCLR e PCF são dependentes dos ganhos de ventilação e das necessidades de energia útil para arrefecimento. Assim sendo, após a aplicação aos dois métodos de simulação escolhidos procedeu-se à explicação do método de cálculo destas duas variáveis para cada uma das modelações efetuadas.

4.3.1. Ganhos de Ventilação, Q_{ve}

Ao expor o edifício em estudo a processos de ventilação, independente da sua origem, está-se a induzir o edifício a uma carga térmica que é necessária ter em consideração no balanço térmico. (Gonçalves & Graça, 2014).

Assim sendo a ventilação pode ser utilizada como sistema de arrefecimento passivo no período do verão, na medida em que não constitui um acréscimo no consumo de energia, com consequências positivas na redução do consumo de energia do sistema AVAC requerida para manter a temperatura interior em conforto.

Segundo o Despacho n.º 15793-K/2013, a condutância de ventilação obtém-se a partir da seguinte equação:

$$H_{ve} = 0.34 \times RPH \times A_{pav} \times P_d \quad [W/^{\circ}C] \quad [19]$$

Onde,

RPH — taxa de renovação por hora do ar interior, [h^{-1}]

A_{pav} — área de pavimento, [m^2]

P_d — pé direito médio do edifício, [m]

No caso da simulação com ventilação natural entre zonas, a variável de saída relativa à ventilação é dada pelo caudal de ventilação, em [m^3/s], nesse caso foi necessário efetuar um cálculo intermédio para obter as renovações por hora totais contabilizando as duas zonas térmicas.

$$RPH = \sum_y \left(\frac{\dot{V}_y}{V_y} \right) \times 3600 \quad [h^{-1}] \quad [20]$$

Em que,

\dot{V}_y – caudal volúmico de admissão na zona térmica y, [m^3/s]

V_y – volume da zona térmica y, [m^3]

Pelo Despacho n.º 15793-I/2013, para a estação de arrefecimento, a transferência de calor por renovação do ar interior é dada por:

$$Q_{ve,v} = \frac{H_{ve} \times (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \times L}{10^3} \quad [kWh] \quad [21]$$

H_{ve} – condutância de ventilação, [$W/^\circ C$]

$\theta_{v,ref}$ – temperatura de referência para o cálculo das necessidades de energia na estação de arrefecimento, 25°C

$\theta_{v,ext}$ – temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento, [$^\circ C$]

Adaptando a equação [21] aos dados horários obtidos a partir das simulações efetuadas os ganhos de ventilação:

$$Q_{ve,v} = \frac{\sum_h H_{ve_h} \times (T_{set} - T_{exterior_h})}{10^3} \quad [kWh] \quad [22]$$

Em que,

T_{set} – temperatura de referência para a abertura das janelas, 22°C

$T_{exterior_h}$ – temperatura do ar exterior a uma dada hora, [$^\circ C$]

A diferença de temperatura considerada representa as horas em que existe potencial de arrefecimento. Para a avaliação do modelo em estudo, considerou-se que T_{set_h} toma o valor de 22°C uma vez que é a temperatura a que se abriu as janelas. A temperatura exterior depende dos dados climáticos do local onde se situa o edifício e a condutância de ventilação varia com a ventilação imposta/natural que ocorre no decorrer da simulação.

Quando a temperatura exterior é superior à temperatura set não existe ventilação e só ocorre infiltração.

Para efeitos do cálculo do índice PCLR a variável considerada será o acréscimo dos ganhos de ventilação potenciada pelo sistema de arrefecimento passivo, ou seja, para efeitos de calculo desta variável apenas será contabilizada a ventilação proveniente do sistema no período noturno não considerando as infiltrações constantes ao longo do dia.

4.3.2. Necessidade de energia útil para arrefecimento, $Q_{nd,v}$

No decorrer da estação de arrefecimento, um edifício necessita de uma determinada quantidade de energia para se proporcionar uma dada temperatura do ar interior, definida como referência. Segundo, Portaria n.º 349-B/2013, a temperatura de referência para a estação de arrefecimento em Portugal é de 25°C por esse motivo pretende-se garantir que a temperatura interior não ultrapassa este valor.

Quando a ventilação, quer mecânica quer natural, não é capaz de manter a temperatura do ar abaixo deste valor, um sistema de climatização ideal entra em funcionamento reduzindo a temperatura do ar interior à temperatura de referência. Esta redução dá-se através de uma dada energia útil calculada em cada uma das simulações.

Para a simulação em que se recorreu ao método horário simplificado o processo de cálculo deste parâmetro encontra-se explicitado no Anexo A sendo no final calculado através da equação [55].

O software EnergyPlus devolve como output as necessidades de arrefecimento necessárias para manter as condições descritas.

Nesta situação optou-se por um sistema de AVAC (HVACTemplate) que permite a otimização do controlo do sistema e não consome energia, logo os dados que devolve consistem apenas nas necessidades reais de energia útil para climatização, arrefecimento ou aquecimento (Graça, Aula 3, 2015). Para este sistema de climatização foi apenas necessário definir a temperatura de set-point de arrefecimento.

O modelo utilizado no software funciona tendo por base a conservação de energia numa zona térmica, ou seja, deve garantir-se que a energia armazenada no ar da zona térmica em estudo seja igual à soma dos ganhos internos, da transferência de calor convectiva das superfícies, ganhos provenientes da infiltração do ar exterior, transferência de calor devido à mistura de ar na zona térmica e o sistema de climatização (Q_{sys}).

As necessidades de energia útil para arrefecimento podem ser obtidas através da seguinte equação:

$$Q_{sys} = \dot{m}_{sys} \times C_{p_{ar}} \times (T_{ref} - T_{zone}) \quad [J] \quad [23]$$

\dot{m}_{sys} —Caudal mássico do ventilador, $[kg/s]$

$C_{p_{ar}}$ —Calor específico do ar, $[J/kg.^\circ C]$

Efetuuou-se posteriormente a conversão para kWh para que os dados de ambas as simulações fossem analisados todos do mesmo modo.

$$Q_{nd,vep} = \frac{\sum_h Q_{sys_h}}{3600 \times 10^3} \quad [kWh] \quad [24]$$

Capítulo 5 - Resultados e discussão

Tendo em consideração os métodos descritos no Capítulo 2, as características do apartamento em estudo no Capítulo 3 e os parâmetros de *input* específicos para cada método descrito no Capítulo 4, procedeu-se à simulação do modelo do método horário simplificado e à modelação computacional de transferência de calor no apartamento a fim de obter dados de necessidades de energia para arrefecimento e caudais de ar novo. Uma vez alcançados os parâmetros, procedeu-se ao seu tratamento de forma a obter a curva PCLR final.

Ao longo deste capítulo é também apresentado o *Root Mean Squared Error* (RMSE), calculado a partir da equação [25]. Este valor dá informação acerca da precisão da curva PCLR. Compara os dados obtidos através dos modelos e os valores calculados a partir da curva.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad [ad] \quad [25]$$

Onde,

n —número de valores válidos

i —índice mensal

y_i —valor mensal correspondente aos dados simulados

\hat{y}_i —valor mensal correspondente aos dados calculados a partir da curva PCLR

As necessidades de energia para arrefecimento sem utilização do sistema de arrefecimento passivo para cada orientação obtidas a partir dos métodos descritos encontram-se apresentadas na Tabela 11 e Tabela 12. Os dados descrevem as necessidades para a totalidade da estação de arrefecimento e foram calculados para os dois perfis de ganhos internos.

Tabela 11: Necessidades de energia para arrefecimento sem utilização do sistema de arrefecimento passivo por área de pavimento para a orientação N-S

Modelo	Clima	Necessidades iniciais Perfil Constante [kWh/m ²]	Necessidades iniciais Perfil Variável [kWh/m ²]
5R1C	Lisboa	7.1	7.2
	Faro	13.8	13.9
	Beja	20.8	20.9
	Castelo Branco	23.8	23.9
	Bragança	9.0	9.1
Ventilação com caudal imposto	Lisboa	31.2	31.3
	Faro	37.6	37.6
	Beja	47.1	47.1
	Castelo Branco	49.1	49.0
	Bragança	29.3	29.4

Modelo	Clima	Necessidades iniciais Perfil Constante [kWh/m ²]	Necessidades iniciais Perfil Variável [kWh/m ²]
Ventilação natural entre zonas	Lisboa	30.2	30.2
	Faro	35.4	35.5
	Beja	41.3	41.3
	Castelo Branco	45.1	45.1
	Bragança	29.5	29.6

Tabela 12: Necessidades de energia para arrefecimento sem utilização do sistema de arrefecimento passivo por área de pavimento para a orientação E-O

Modelo	Clima	Necessidades iniciais Perfil Constante [kWh/m ²]	Necessidades iniciais Perfil Variável [kWh/m ²]
5R1C	Lisboa	15.1	15.2
	Faro	22.9	22.9
	Beja	30.4	30.4
	Castelo Branco	32.7	32.7
	Bragança	15.0	15.1
Ventilação com caudal imposto	Lisboa	57.4	57.3
	Faro	65.1	65.0
	Beja	74.5	74.5
	Castelo Branco	73.8	73.8
	Bragança	49.0	49.1
Ventilação natural entre zonas	Lisboa	59.8	59.8
	Faro	67.2	67.3
	Beja	73.0	73.0
	Castelo Branco	74.8	74.8
	Bragança	54.3	54.3

A alteração da orientação dos vãos envidraçados resulta no aumento entre 27% a 49% das necessidades para a orientação E-O em todas as simulações quando comparadas com a orientação N-S. Na orientação E-O a radiação apresenta ângulos de incidência próximos da normal à fachada o que maximiza a captação de energia solar (Gonçalves & Graça, 2014). No período da manhã, a fachada que recebe maior radiação solar é a Este e durante o período da tarde a Oeste estando deste modo expostas à radiação solar durante todo o dia. Na orientação N-S apesar da janela a Sul não possuir qualquer tipo de sombreamento e recebendo maior quantidade de radiação no período do meio-dia a fachada Norte recebe apenas uma pequena fração permitindo que não existam ganhos solares tão elevados.

Atentando às necessidades de energia para arrefecimento, em ambas as orientações, é possível verificar que a diferença entre perfis de ganhos constante e variável é bastante reduzida, tendo um desvio máximo de aproximadamente 2%.

Numa situação ideal seria de esperar que em todos os modelos as necessidades de arrefecimento fossem semelhantes, principalmente nas simulações em que se considera apenas uma zona térmica.

Comparando os dados obtidos através do método horário simplificado com os do modelo de ventilação com caudal imposto, os valores de necessidades para a simulação em *EnergyPlus* são entre 50% a 70% superiores aos obtidos pelo modelo 5R1C. Para a localização dos vãos envidraçados em N-S, a diferença, em média, é de 24 kWh/m² e para a orientação E-O atinge, em média, 40kWh/m². Esta discrepância acentuada pode justificar-se através das fragilidades inerentes ao método de calculo apresentado na Norma ISO 13790:2008. Encontra-se em desenvolvimento uma proposta normativa ISO 52016-1 que altera, para o método horário simplificado, a abordagem de calculo aos nós de temperatura alterando deste modo o método de calculo do modelo 5R1C. Segundo Rainho (2015), quando comparadas as necessidades de energia para arrefecimento calculadas a partir do método presente na EN ISO 13790 e na proposta normativa ISO 52016-1 os dados provenientes da proposta normativa aproximam-se mais dos dados devolvidos pelo *software EnergyPlus* (Rainho, 2015).

As simulações obtidas a partir da modelação em *EnergyPlus* possuem valores de necessidade mais próximos do que quando comparados com o método horário simplificado, mas mesmo assim apresentam alguma diferença entre valores. Uma das razões para esta diferença é a taxa de ar novo considerada em cada modelo. As infiltrações ocorridas no modelo de ventilação natural entre zonas dependem exclusivamente das fendas existentes nos vãos envidraçados e fachadas, tendo por esse motivo valores muito baixos, tomando em média o valor de 10⁻⁴ RPH. No caso do modelo que estuda a ventilação com caudal imposto o valor de infiltrações é definido, 0.6 RPH.

Esta disparidade de infiltrações causa dois efeitos ambíguos:

- Quando a temperatura do ar exterior é mais baixa que a do ar interior o efeito é benéfico para o arrefecimento do apartamento uma vez que, remove carga térmicas que se encontram em excesso diminuindo a temperatura do ar interior. Para a simulação com caudal imposto, esta remoção é mais significativa uma vez que o caudal de infiltração permite uma maior eliminação de cargas térmicas. Para a ventilação natural entre zonas o efeito é praticamente nulo não tendo por esse motivo impacto significativo.
- Quando a temperatura do ar exterior é mais elevada, atingindo valores iguais ou superiores à temperatura do ar interior. O efeito da infiltração será exatamente o contrário, a infiltração colocará no apartamento mais carga térmica. O modelo com caudal imposto, ao possuir uma taxa de infiltração maior, terá em vez de uma contribuição positiva o aumento da carga térmica e, consequentemente, contribuirá para o aumento da temperatura do ar interior. O modelo com ventilação natural mantém-se inalterado não tendo um impacto significativo.

Deste modo, para o modelo de ventilação imposta, na orientação N-S, a temperatura do ar interior é geralmente mais baixa quando comparada com a temperatura do ar exterior, pelo que a infiltração introduz ganhos no apartamento. No caso da orientação E-O, acontece o contrário, como a temperatura do ar interior, devido aos ganhos solares, sobe em relação ao cenário N-S, esta passa a ser quase sempre superior à temperatura do ar exterior. Desta forma a infiltração induz a perdas térmicas, tendo por isso um maior impacto na redução das necessidades de energia para arrefecimento. As necessidades de energia para arrefecimento no modelo de ventilação natural entre zonas não sofrem um impacto significativo com o efeito da infiltração.

O sistema de arrefecimento passivo, nas simulações efetuadas com o modelo 5R1C e com o modelo de ventilação com o caudal imposto, tem valores de ventilação de 2, 5 e 10 RPH. Para a simulação de ventilação natural entre zonas o caudal de ventilação depende apenas da abertura da janela. Para a segunda simulação, como o caudal não é imposto pode-se observar através do Gráfico 3 o valor das renovações por hora atingidas para Lisboa e Algarve, os climas que em média obtêm maior e menor renovações por hora, respetivamente.

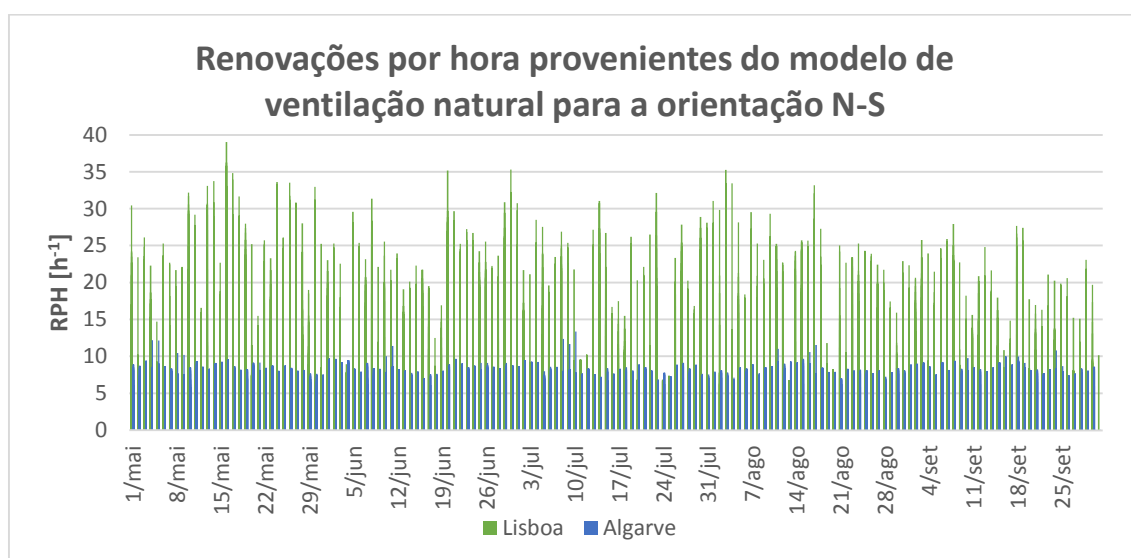


Gráfico 3: Renovações por hora de ar novo ocorridas para o modelo de ventilação natural entre zonas para a orientação N-S

Para a orientação E-O os climas que apresentam a maior e menor média de renovação de ar novo são Bragança e Castelo Branco, respetivamente. Pode observar-se o valor das renovações por hora atingidas nestes climas no Gráfico 4:

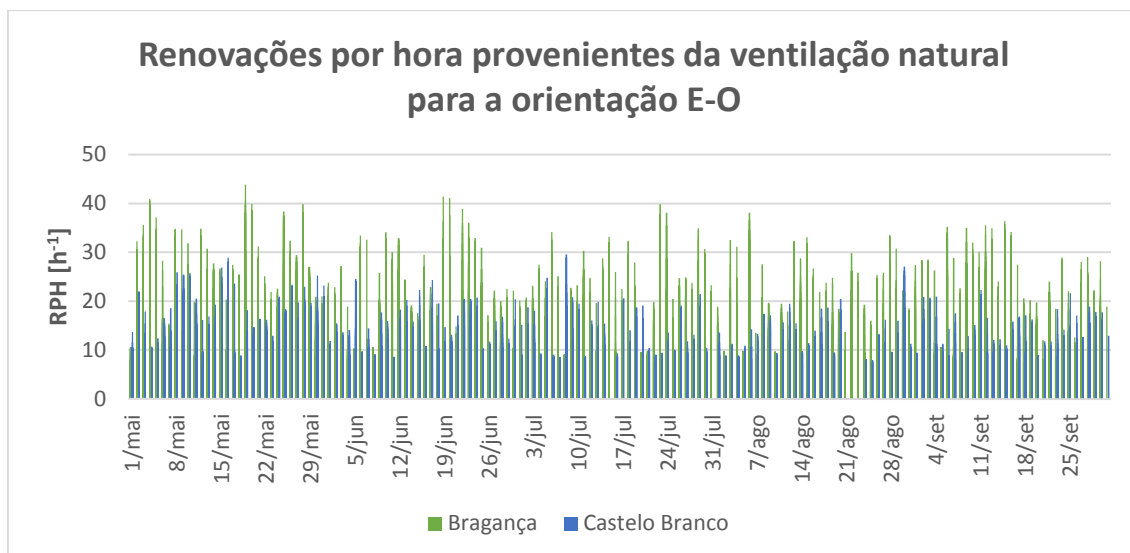


Gráfico 4: Renovações por hora de ar novo ocorridas para o modelo de ventilação natural entre zonas para a orientação E-O

Considerando os gráficos 3 e 4, observa-se que na situação em que a média de renovações por hora é mais baixa, para ambas as orientações, são atingidas as renovações por hora testadas nos modelos 5R1C e ventilação com caudal imposto, sendo deste modo os caudais considerados próximos do que se consegue atingir com a ventilação natural.

Nas simulações, o acréscimo nos ganhos de ventilação devido ao sistema de arrefecimento passivo ocorre apenas no período noturno, quando a temperatura exterior é favorável ao arrefecimento do apartamento. Quanto maior o potencial para arrefecimento maior é o acréscimo nos ganhos de ventilação, logo mais eficazmente a carga térmica é removida promovendo a redução da temperatura do ar interior.

As reduções nas necessidades de energia para arrefecimento com a utilização do sistema de arrefecimento passivo encontram-se apresentadas na Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13: Redução percentual das necessidades de energia para arrefecimento através da utilização do sistema de arrefecimento passivo pelo modelo de ventilação com caudal imposto e modelo 5R1C com perfil de ganhos internos variável em ambas as orientações

Modelo	Clima	Redução percentual das necessidades orientação N-S			Redução percentual das necessidades orientação E-O		
		2	5	10	2	5	10
5R1C	Lisboa	50%	78%	89%	40%	71%	84%
	Faro	27%	53%	68%	24%	46%	62%
	Beja	22%	46%	63%	20%	41%	55%
	Castelo Branco	18%	38%	53%	16%	33%	47%
	Bragança	47%	79%	91%	36%	68%	84%
	Lisboa	26%	51%	64%	18%	44%	57%
	Faro	19%	38%	48%	12%	34%	45%

Modelo	Clima	Redução percentual das necessidades orientação N-S			Redução percentual das necessidades orientação E-O		
Ventilação com caudal imposto	Beja	16%	33%	43%	10%	29%	40%
	Castelo Branco	12%	28%	37%	8%	25%	35%
	Bragança	26%	52%	66%	21%	46%	60%

Tabela 14: Redução percentual das necessidades de energia para arrefecimento através da utilização do sistema de arrefecimento passivo pelo modelo de ventilação natural entre zonas com perfil de ganhos internos variável em ambas as orientações

Modelo	Clima	Redução percentual das necessidades orientação N-S	Redução percentual das necessidades orientação E-O
Ventilação natural entre zonas	Lisboa	79%	63%
	Faro	54%	56%
	Beja	57%	52%
	Castelo Branco	45%	43%
	Bragança	84%	76%

É possível verificar, através das Tabela 13 e Tabela 14, que as necessidades de arrefecimento sofrem uma grande redução com a utilização da ventilação como sistema de arrefecimento passivo. Para as simulações em que se impõe caudal, quanto maior o numero de renovações por hora maior a redução nas necessidades. O modelo 5R1C apresenta uma média de reduções de 52% e consegue atingir um valor máximo de redução de 91%. O modelo de ventilação com caudal imposto é o que apresenta uma média de reduções mais baixa, no valor de 35%. Por fim, o modelo de ventilação natural entre zonas é o que, em média, atinge uma maior percentagem de redução, 60%. Este valor mais elevado pode justificar-se devido circulação do fluxo de ar entre zonas o que aumenta a eficácia da ventilação.

A nível mensal o impacto da ventilação é mais perceptível. Para o mês em que existe menos necessidades de arrefecimento, como é o caso de maio, a utilização da ventilação promove uma diminuição total nas necessidades, em alguns climas. Para a orientação N-S, no mês de maio, as simulações realizadas através do *software EnergyPlus* têm necessidades nulas em Lisboa, Faro e Bragança e segundo o método horário simplificado todos os climas não têm necessidades de arrefecimento neste mês estendendo-se a diminuição total, em algumas situações, ao mês de junho. Para a orientação E-O como as necessidades sem utilização dos sistemas de arrefecimento são muito elevadas apenas pontualmente se consegue anular as necessidades de arrefecimento.

Após a obtenção dos dados de ganhos de ventilação e necessidades de energia para arrefecimento aplicou-se o método PCLR adaptado a fim de se obter a curva PCLR.

Tendo por base as equações [3] e [4] calculou-se os parâmetros PCLR e PCF. O parâmetro PCLR depende do acréscimo dos ganhos de ventilação e das necessidades de energia para arrefecimento antes da utilização do sistema de arrefecimento passivo. Quando as necessidades de arrefecimento são muito inferiores comparadas ao acréscimo dos ganhos de ventilação, o PCLR toma valores muito elevados. Deste modo foi necessário limitar o valor de PCLR uma vez que empiricamente para PCLR elevados o PCF tomará valores de 1. Assim sendo limitou-se o valor de PCLR a 15 excluindo todos os dados acima deste valor.

O Gráfico 5 representa a distribuição dos dados obtidos a partir da simulação com o modelo 5R1C.

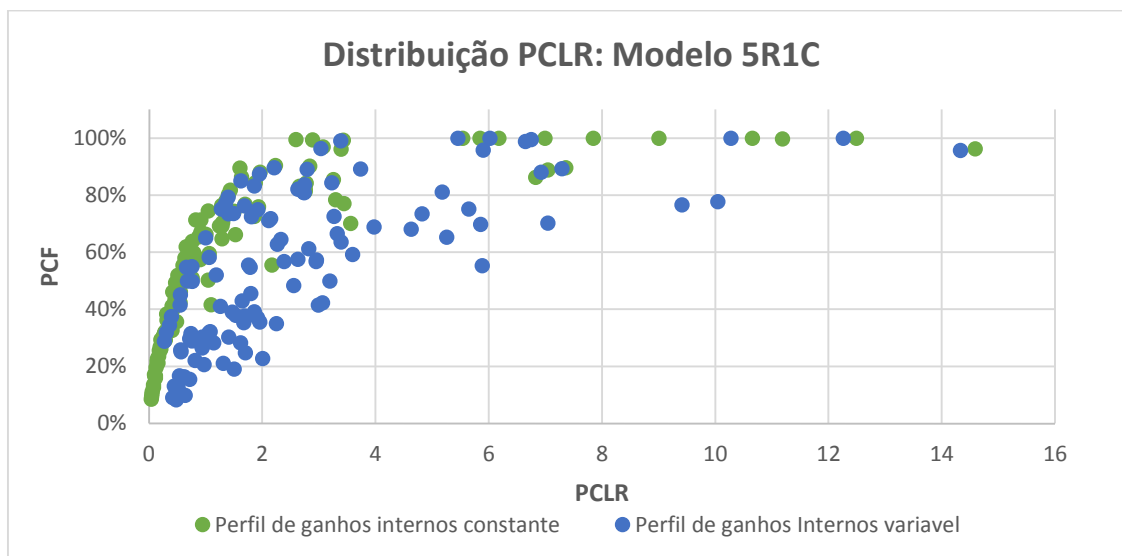


Gráfico 5: Distribuição PCLR: Modelo 5R1C

Como já tinha sido referido o modelo 5R1C apresenta algumas fragilidades. Observando a distribuição de dados obtida existe uma diferença significativa entre a distribuição em que se utiliza o perfil de ganhos internos constantes e a variável, algo que não era expectável. A partir da distribuição apresentada no Gráfico 5 é possível concluir que o método horário simplificado não tem um comportamento uniforme quando o perfil de ganhos não é constante uma vez que não demonstra um comportamento constante.

Deste modo a curva PCLR obtida para este método tem um ajuste fraco, caracterizado por $R^2=0.64$, como se pode observar no Gráfico 6:

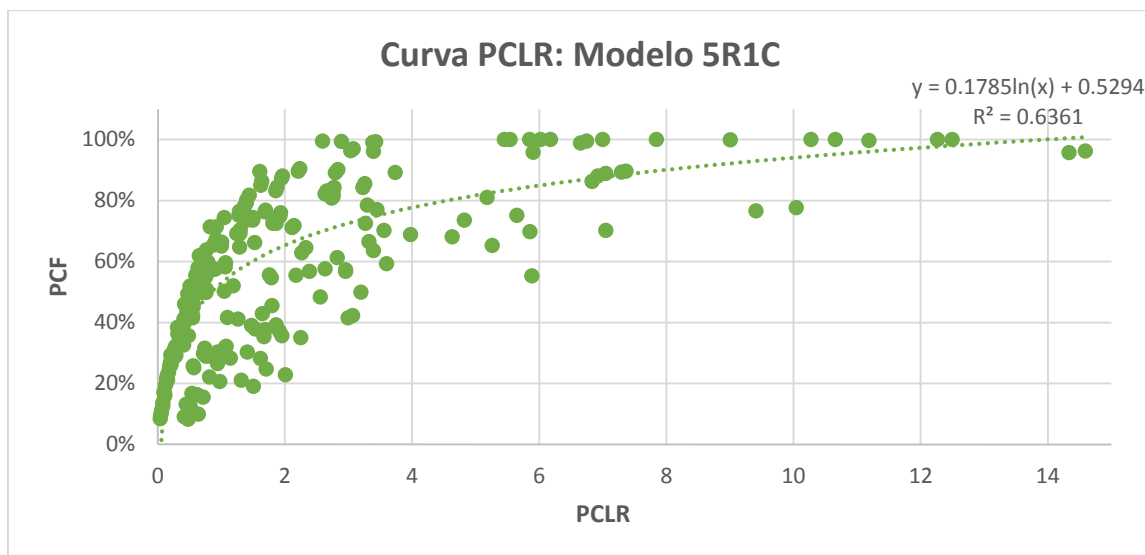


Gráfico 6: Curva PCLR: Modelo 5R1C

O Gráfico 7 descreve a distribuição PCLR para o modelo de ventilação com o caudal imposto. Para esta distribuição é possível visualizar que os dados quer para o perfil constante quer para o perfil variável de ganhos internos apresentam um comportamento mais uniforme aproximando-se a distribuição de uma curva do tipo logarítmica.

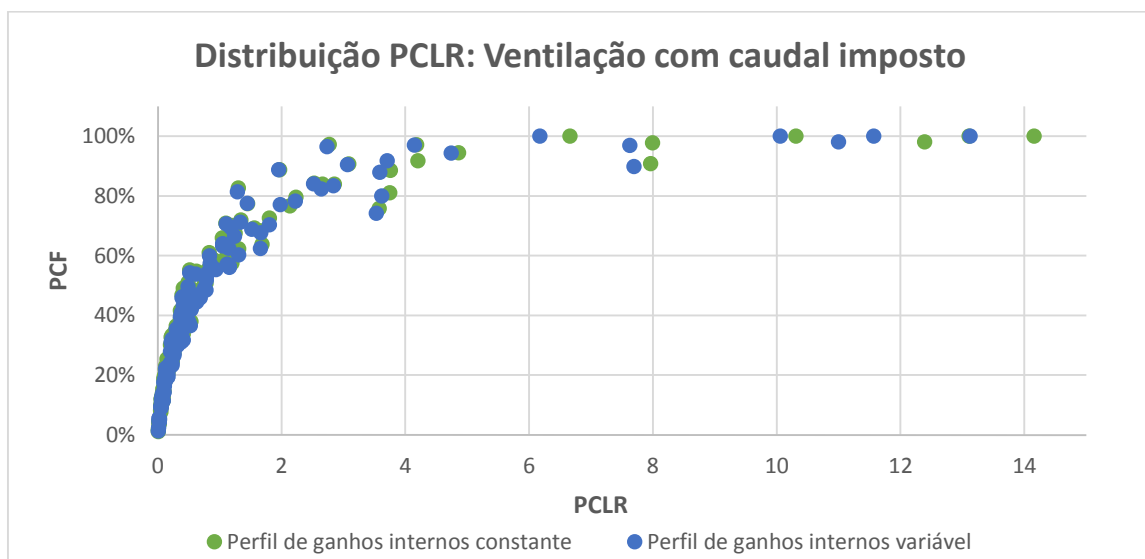


Gráfico 7: Distribuição PCLR: Simulação da ventilação com caudal imposto

O Gráfico 8 ilustra o ajuste da distribuição dos dados a curva PCLR para o modelo de ventilação com caudal imposto, com $R^2=0.94$, muito superior ao caso anterior.

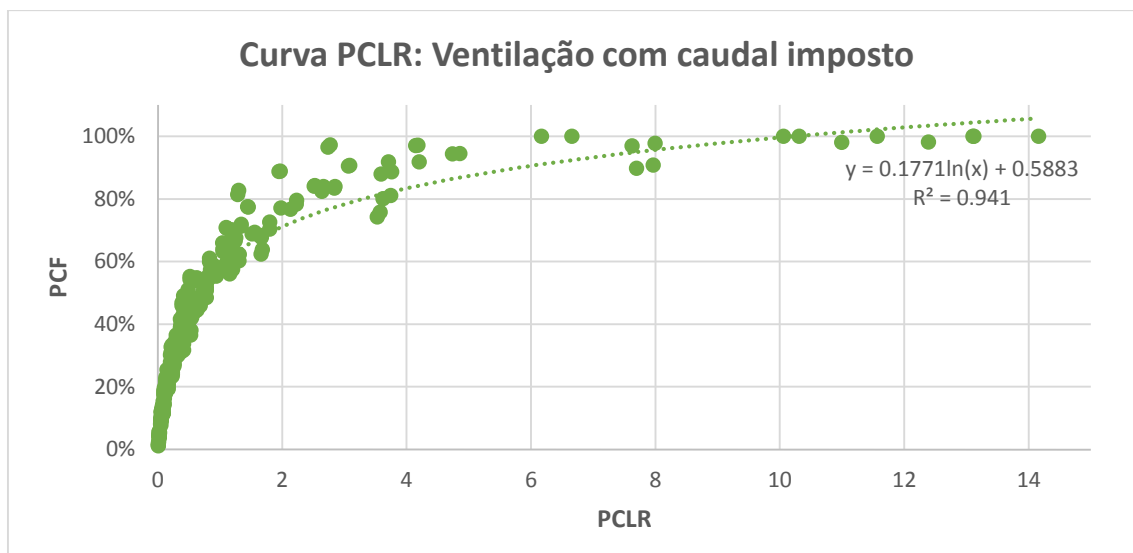


Gráfico 8: Curva PCLR: Simulação do modelo ventilação com caudal imposto

Por fim, o Gráfico 9 apresenta a distribuição de dados dos índices PCLR e PCF para o modelo de ventilação natural entre zonas. O comportamento dos dados para os perfis de ganhos internos é bastante próximo.

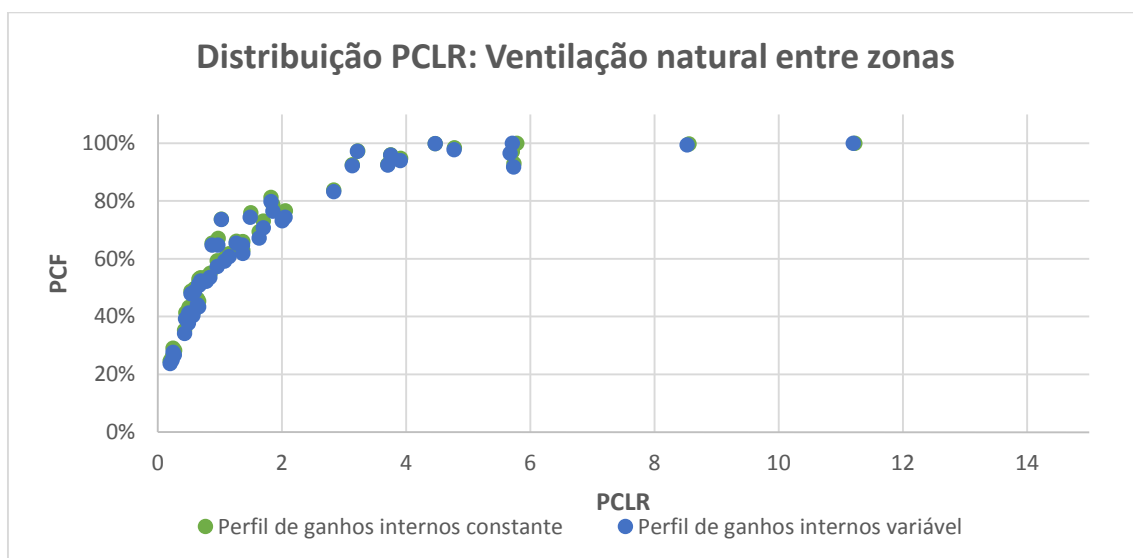


Gráfico 9: Distribuição PCLR: Simulação do modelo de ventilação natural entre zonas térmicas

A curva logarítmica para o modelo de ventilação natural encontra-se apresentada no Gráfico 10 e tem um ajuste ligeiramente superior ($R^2=0.95$).

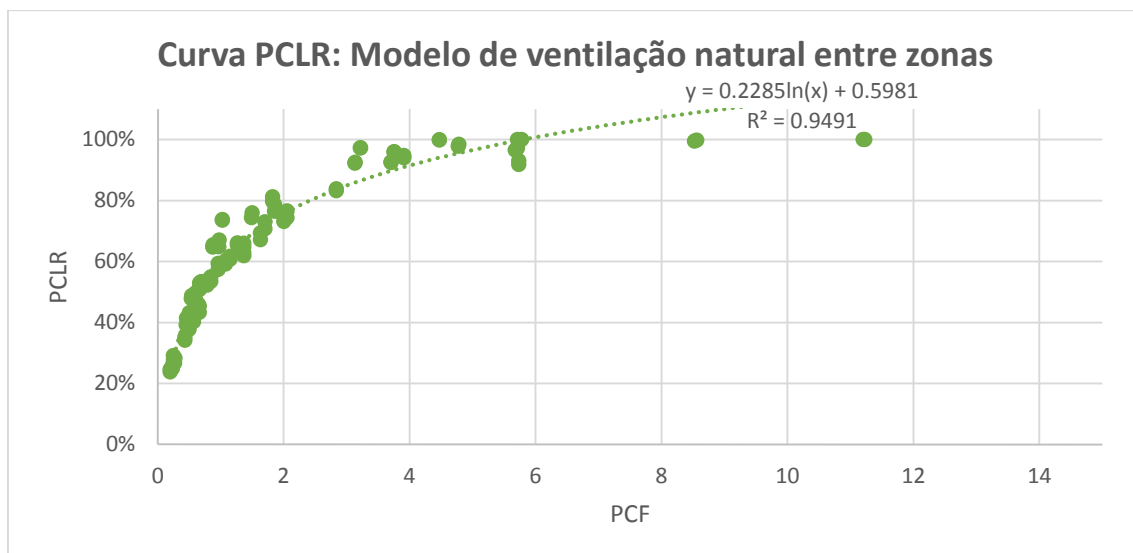


Gráfico 10: Curva PCLR: Simulação do modelo ventilação natural entre zonas

Antes de efetuar a curva final de PCLR procedeu-se à análise do erro RMSE calculado a partir da equação [25].

Observando a Tabela 15 é possível concluir que, como esperado, o ajuste que apresenta maior erro associado entre os dados de simulação e os dados calculados pela curva é o obtido a partir do modelo 5R1C. As curvas PCLR obtidas a partir dos dados de simulação através do *software EnergyPlus* apresentam valores de erro inferiores a 0.5%. Deste modo para traçar a curva final de PCLR considerou-se apenas a distribuição de dados das simulações efetuadas a através do *software EnergyPlus*.

Tabela 15: Erro RMSE da curva PCLR para as diferentes simulações efetuadas

Método horário simplificado	Modelo ventilação com caudal imposto	Modelo com ventilação natural entre zonas
3.48%	0.42%	0.27%

No Gráfico 11 encontra-se a curva de PCLR para o sistema de arrefecimento passivo por ventilação.

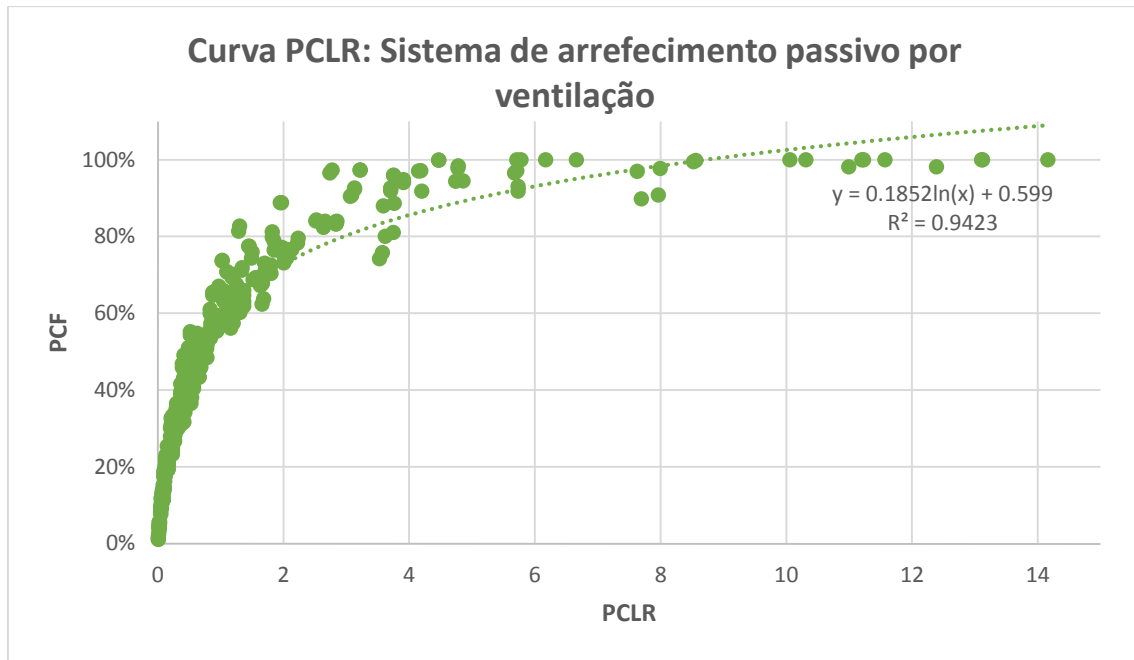


Gráfico 11: Curva PCLR final: Sistema de arrefecimento passivo por ventilação

A curva final obtida descreve as reduções que são possíveis de atingir com o sistema de arrefecimento passivo com recurso à ventilação e apresenta um erro de 0.33%.

É possível observar que o limite máximo imposto para PCLR (15) não influencia os resultados uma vez que a curva final demonstra que a partir do valor de PCLR de 8.7 os valores das reduções nas necessidades de arrefecimento terão de ser sempre iguais a 100% (condição imposta ao modelo).

Assim sendo a partir da equação [26] é possível obter as reduções conseguidas utilizando a ventilação como sistema de arrefecimento tendo conhecimento dos ganhos de ventilação e das necessidades de arrefecimento antes da utilização do sistema de arrefecimento passivo.

$$PCF = \begin{cases} 0, & PCLR \leq 0 \\ 0.185 \times \ln(PCLR) + 0.599, & 0 < PCLR \leq 8.7 \\ 1, & PCLR > 8.7 \end{cases} \quad [ad] \quad [26]$$

Capítulo 6 – Exemplo de aplicação do método PCLR

Para melhor percepção da aplicabilidade do modelo desenvolvido, efetuou-se um exemplo prático, demonstrando os passos que um usuário tem de seguir para chegar ao valor final de poupança de energia para arrefecimento utilizando como sistema de arrefecimento passivo a ventilação natural.

- **Guia de Cálculo:**

Os cálculos necessários foram realizados tendo por base os parâmetros descritos no Despacho n.º 15793-I/2013 e Despacho n.º 15793-K/2013 do REH.

As necessidades de energia para arrefecimento são calculadas a partir da equação [27].

$$N_{vc} = \frac{(1 - \eta_v) \times Q_{g,v}}{A_{pav}} \quad \begin{matrix} [kWh \\ /m^2 \cdot ano] \end{matrix} \quad [27]$$

Em que,

η_v –fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento, [ad]

$Q_{g,v}$ –ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, [kWh]

A_{pav} –área útil de pavimento, medida pelo interior, [m²]

Os ganhos térmicos na estação de arrefecimento obtêm-se por [28].

$$Q_{g,v} = Q_{int,v} + Q_{sol,v} \quad [kWh] \quad [28]$$

Onde,

$Q_{int,v}$ – ganhos térmicos associados a fontes internas de calor na estação de arrefecimento, [kWh]

$$Q_{int,v} = \frac{q_{int} \times A_{pav} \times L_v}{10^3} \quad [kWh] \quad [29]$$

q_{int} –ganhos térmicos médios por unidade de superfície, 4 W/m²

L_v –Duração da estação de arrefecimento, 2928 h

$Q_{sol,v}$ –Ganhos térmicos associados à radiação solar incidente na envolvente na estação de arrefecimento, [kWh]

$$Q_{sol,v} = \sum_j [G_{sol,j} \times \sum_n F_{s,v_{n_j}} \times A_{s,v_{n_j}}] \quad [kWh] \quad [30]$$

$G_{sol,j}$ –Energia solar média incidente numa superfície com orientação j durante toda a estação de arrefecimento, [kWh/m²]

$F_{s,v_{n_j}}$ –Fator de obstrução da superfície do elemento n, com a orientação j, [ad]

$A_{s,v_{n_j}}$ –Área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento n com a orientação j, $[m^2]$

- Para os vãos envidraçados exteriores: $A_{s,v_{n_j}} = A_w \times F_g \times g_v$

Onde,

A_w –Área total do vão envidraçado incluindo vidro e caixilharia, $[m^2]$

F_g – Fração de vão envidraçada, valores tabelados no Despacho n.º 15793-K/2013, $[ad]$

g_v –Fator solar do vão envidraçado na estação de arrefecimento, equação [8], $[ad]$

- Para a envolvente opaca: $A_{s,v_{n_j}} = \alpha \times U \times A_{op} \times R_{se}$

α – coeficiente de absorção de radiação solar da superfície do elemento da envolvente opaca, valores tabelados no Despacho n.º 15793-K/2013, $[ad]$

U –coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente opaca, equação [12], $[W/m^2\text{°C}]$

A_{op} –área do elemento da envolvente opaca exterior, $[m^2]$

R_{se} –resistência térmica superficial exterior, Tabela 6, $[ad]$

Segundo o Despacho n.º 15793-K/2013, o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento é obtido através das seguintes equações:

$$Y = \frac{Q_{g,v}}{Q_{tr,v} + Q_{ve_i}} \quad [ad] \quad [31]$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{1 - Y^a}{1 - Y^{a+1}}, & Y \neq 1 \text{ e } Y > 0 \\ \frac{a}{a+1}, & Y = 1 \\ \frac{1}{Y}, & Y < 0 \end{cases} \quad [ad] \quad [32]$$

Onde,

a –função da classe de inércia térmica do edifício, $[ad]$

$Q_{tr,v}$ - Transferência de calor por transmissão através da envolvente dos edifícios, na estação em estudo $[kWh]$

$$Q_{tr,v} = \frac{H_{tr,v} \times (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \times L_v}{10^3} \quad [kWh] \quad [33]$$

$H_{tr,v}$ –Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento obtido a partir da equação [9], $[W/\text{°C}]$

$\theta_{v,ref}$ – Temperatura de referência para o cálculo das necessidades de energia para arrefecimento, 25°C

$\theta_{v,ext}$ – Temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento, obtida a partir do Despacho n.º 15793-F/2013, [°C]

$Q_{ve,v}$ - Transferência de calor por ventilação na estação em estudo sem utilização do sistema de arrefecimento passivo [kWh]

$$Q_{ve,v} = \frac{H_{ve,v} \times (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \times L_v}{10^3} \quad [kWh] \quad [34]$$

$H_{ve,v}$ – Coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento, calculado através da equação [19]. Para efeitos de cálculo do fator de utilização dos ganhos térmicos da estação de arrefecimento considerou-se que as infiltrações iniciais, tal como explicitado no Despacho n.º 15793-K/2013 tomam o valor de referência de 0.6 RPH, [W/°C]

Por fim calcular o PCLR tendo por base a equação [3], obtém-se a equação [35]:

$$PCLR = \frac{\Delta Q_{ve}}{N_{vc}} \quad [kWh] \quad [35]$$

O acréscimo dos ganhos de ventilação pela utilização da ventilação noturna é dada pela equação [36]:

$$\Delta Q_{ve} = \frac{Q_{ve,SP} - Q_{ve,i}}{A_{pav}} \quad [kWh/m^2] \quad [36]$$

Onde,

$Q_{ve,i}$ –transferência de calor por ventilação sem utilização do sistema de arrefecimento passivo, [kWh]

$Q_{ve,SP}$ –transferência de calor por ventilação com utilização do sistema de arrefecimento passivo. Para efeitos de cálculo é necessário ter em consideração a distribuição da infiltração e ventilação ao longo do dia, [kWh]

$$Q_{ve,SP} = \frac{H_{ve,SP} \times (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \times L_v}{10^3} \quad [kWh] \quad [37]$$

Em que,

$H_{ve,SP}$ – Coeficiente global de transferência de calor por ventilação, [W/°C]

Aplicar o valor de PCLR à equação [26] ou através da leitura direta do Gráfico 12, obtendo-se o valor de PCF correspondente à poupança energética.

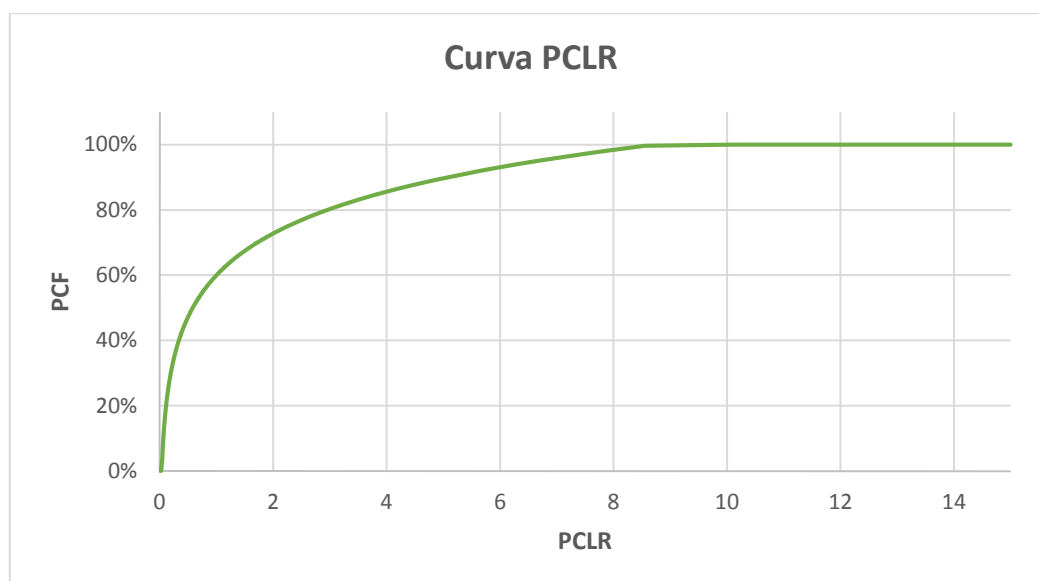


Gráfico 12: Curva PCLR para aplicação do método

- **Exemplo:**

Considerou-se como exemplo uma habitação com a mesma estrutura e dimensões da caracterizada no Capítulo 3, Figura 4, localizada em Lisboa, com as fachadas em contacto com o exterior orientadas a N-S e com as características construtivas e térmicas descritas na secção 3.1 do Capítulo 3.

Os parâmetros considerados encontram-se resumidos na Tabela 16:

Tabela 16: Características e parâmetros caso-exemplo

Parâmetros Climáticos: Grande Lisboa ³			
Temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento	$\theta_{v,ext}$	21.7	[°C]
Energia solar acumulada durante a estação para a orientação Sul	$I_{sol,N}$	220	[kWh/m ²]
Energia solar acumulada durante a estação para a orientação Norte	$I_{sol,S}$	425	[kWh/m ²]
Parâmetros da Habitação ⁴			
Área de pavimento	A_{pav}	84	[m ²]
Área opaca	A_{op}	161	[m ²]
Área de vão envidraçado a Norte	$A_{w,N}$	4	[m ²]
Área de vão envidraçado a Sul	$A_{w,S}$	3	[m ²]
Área total dos vãos envidraçados	$A_{w,Total}$	7	[m ²]
Condutância de Transmissão	H_{tr}	102.1	[W/°C]
Fração envidraçado	F_g	0.65	[ad]
Fator Solar para a orientação Norte	g_{v_N}	0.75	[ad]

³ Dados obtidos tendo por base os valores para a região da Grande Lisboa para a estação de arrefecimento presentes no Despacho n.º 15793-F/2013.

⁴ Dados referidos ao longo do 0.

Fator Solar para a orientação Sul	g_{v_s}	0.7	[ad]
Coeficiente de transferência global da envolvente opaca	U_{op}	1.05	[W/m ² °C]
Parâmetros específicos ⁵			
Coeficiente de absorção – parede clara	α	0.35	[ad]
Função da classe de inércia térmica do edifício – Inércia Elevada	a	4.2	[ad]

Para efeitos de infiltração considerou-se 0.6RPH e de ventilação, o valor médio de, 4 RPH.

A partir das equações descritas ao longo do presente capítulo, tendo em consideração as características apresentadas na Tabela 16, obteve-se os dados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Resultados finais para a habitação exemplo

Necessidades de energia para arrefecimento	18 kWh/m ²
Acréscimo nos ganhos de ventilação do sistema de arrefecimento passivo	14 kWh/m ²
PCLR	0.78

Para obter o valor de poupança energética observou-se o Gráfico 12 e procurou-se o valor correspondente na curva a um PCLR de 0.78. Conclui-se que existe, com a utilização do sistema de arrefecimento passivo por ventilação, através do Gráfico 13, uma poupança de, aproximadamente, 55%. As necessidades de energia para arrefecimento foram assim reduzidas para 8.1 kWh/m².

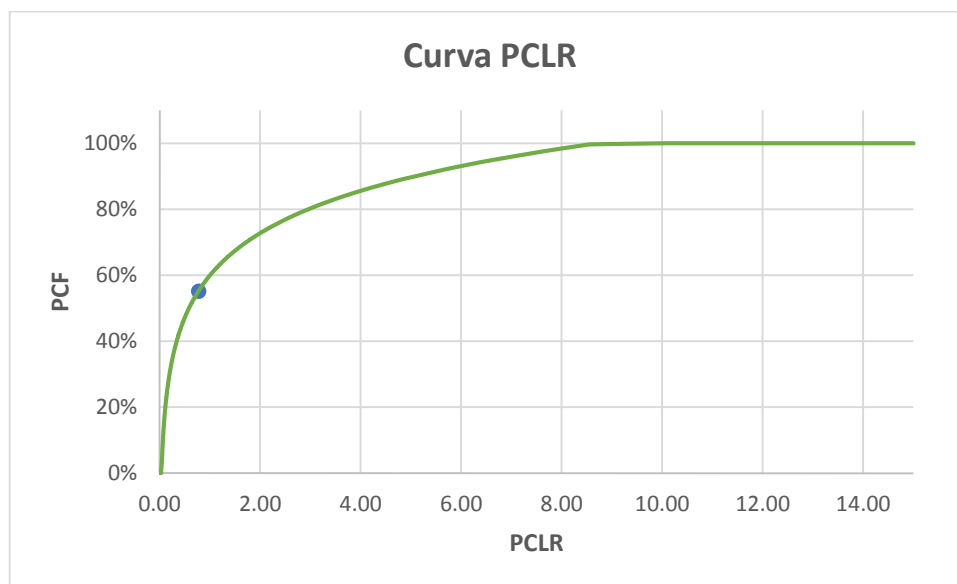


Gráfico 13: Curva PCLR- Exemplo

⁵ Dados obtidos a partir do Despacho n.º 15793-K/2013.

Capítulo 7 - Conclusão

A diminuição do consumo de energia nos edifícios é cada vez mais importante para se poder atingir a meta, enunciada pela Diretiva Europeia, dos edifícios novos e já existentes se aproximarem o mais possível de edifícios com necessidades energéticas quase nulas (*nZEB*).

O método PCLR alterado relativamente à versão original (Nunes & Panão, 2013) consiste num método que caracteriza, de forma simplificada e sem recorrer a valores de elevada exatidão, o potencial de redução das necessidades de energia para arrefecimento quando se utilizam estratégias de arrefecimento passivo baseadas na ventilação.

A caracterização do efeito do sistema de arrefecimento nas necessidades de energia para climatização foi efetuada tendo por base três modelos de simulação.

O método horário simplificado (modelo 5R1C), que relevou alguma fragilidade uma vez que:

- Foi necessário criar um modelo, com uma zona térmica e caudal imposto, visto que o modelo 5R1C não permite uma correta simulação de outras situações como é o caso da ventilação natural entre zonas.
- Apresenta uma distribuição de PCLR não uniforme quando se utiliza um perfil de ganhos internos variável.
- Um coeficiente de determinação de 0.64 entre os dados obtidos através da simulação e a curva PCLR o que conduz a um erro de 3%.

Simulação em *EnergyPlus* do modelo de ventilação com caudal imposto, que permitiu:

- A comparação, para o mesmo modelo de simulação, dos dados obtidos através do modelo 5R1C e do *software*. As necessidades de energia para arrefecimento calculadas pelo *software EnergyPlus* são 50% a 70% superiores às obtidos a partir do modelo 5R1C. Esta discrepância de valores evidencia as possíveis fragilidades de cálculo do método horário simplificado.

Modelo de ventilação natural entre zonas, permitiu concluir que:

- Os caudais pré-definidos de ventilação nos modelos com caudal imposto se encontram dentro da gama de RPH conseguidas através da ventilação natural, em média consegue atingir valores entre 3 a 7 RPH para a orientação N-S e 4 a 8 RPH para a orientação E-O.
- As infiltrações mínimas definidas pelo regulamento não conseguem ser atingidas apenas com a utilização de ar admitido pelas fendas das fachadas e vãos envidraçados, rondando apenas as 10^{-4} RPH.
- Este modelo apresenta o maior valor médio de poupança, 64%. Este valor pode dever-se às renovações por hora atingidas e à transição do fluxo de ar entre zonas permitindo o aumento da eficácia do sistema passivo.
- É possível atingir pontualmente valores significativamente elevados para as taxas de renovação do ar, que podem ser reduzidas para valores inferiores da área de abertura da janela.

Quanto à não limitação da temperatura mínima de admissão do ar exterior, pode verificar-se que pontualmente existe uma diminuição significativa da temperatura do ar interior o que pode causar desconforto nos ocupantes. Esta limitação não foi implementada pois pretendeu-se avaliar o potencial total da estratégia de arrefecimento passivo.

Tendo por base o resultado obtido de uma redução máxima de 84% para a totalidade da estação de arrefecimento, é possível concluir que o período em horas de aplicabilidade da estratégia, no período noturno, se revelou adequado tal como as temperaturas para controlo de abertura dos vãos envidraçados.

A curva PCLR final correlaciona-se com coeficiente de determinação de 0.95 aos resultados obtidos para a redução das necessidades de energia para arrefecimento. Para a obtenção da curva apenas se consideraram os dados obtidos a partir dos modelos de simulação realizados pelo *software EnergyPlus* uma vez que os erros associados à curva PCLR por cada um dos métodos apresenta valores inferiores a 0.5%. Na sua globalidade a curva conduz a erros de 0.3%.

O método PCLR desenvolvido ao longo da presente dissertação revelou ser de simples aplicabilidade, dependendo apenas de variáveis de fácil parametrização: 1) condições climáticas em termos de graus-hora de arrefecimento na estação de arrefecimento, 2) necessidades de energia para arrefecimento sem aplicação de estratégias de arrefecimento passivo e 3) taxa de renovação do ar por ventilação noturna.

A estimativa do potencial de redução através da estratégia de arrefecimento passivo é uma metodologia passível de ser integrada em métodos simplificados como o método quase-estacionário e como o adotado no REH.

Referências

- Artmann, N., Manz, H., & P. Heiselberg. (2008). Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation. *Renewable Energy* 33, 2589-2598.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). Appendix A Thermophysical Properties of Matter. Em *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th Edition* (pp. 981-1011). United States of America: John Wiley & Sons.
- Berkeley Lab WINDOW. (6 de Novembro de 2015). Obtido de LBNL Windows & Daylighting Software -- Window:
https://windows.lbl.gov/software/window/6/w6_download6_3_74.asp?
- Cardoso, F. (19 de Dezembro de 2015). *Edifícios e Energia: NZEB: Metade dos Estados-Membros ainda sem definição oficial*. Obtido de Edifícios e Energia:
<http://edificioseenergia.pt/pt/noticia/nzeb-metade-dos-paises-ainda-nao-tem-definicao-oficial999>
- Decreto-Lei n.º 118/2013. (2013). *Diário da República, 1.ª série — N.º 159*. Portugal.
- EnergyPlus. (2015). Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations.
- EnergyPlusTM. (2015). InputOutput Reference. *The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*.
- European Commission. (19 de Dezembro de 2015). *Buildings - European Commission*. Obtido de <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>
- Gonçalves, H., & Graça, J. M. (Novembro de 2014). Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal. Lisboa, Portugal: DGGE / IP-3E.
- Graça, G. C. (2015). Aula 1. *Simulação Computacional em Edifícios*. Lisboa.
- Graça, G. C. (2015). Aula 2. *Simulação Computacional em Edifícios*. Lisboa.
- Graça, G. C. (2015). Aula 3. *Simulação Computacional em Edifícios*. Lisboa.
- INE, & DGEG. (2010). Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico. Portugal.
- ISO13790:2007. (2007). Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space.
- LNEG. (29 de Outubro de 2014). *Clima*. Obtido de LNEG Investigação para a Sustentabilidade:
<http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>
- Normative Proposal ISO/DIS 52010. (2015). *DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO / DIS 52010-1 Energy performance of buildings — Overarching Assessment Proce.*
- Nunes, A. F., & Panão, M. (2013). Passive Cooling Load Ratio method. *Energy and Buildings* 64, 209–217.
- Nunes, A. I. (2012). Contributo das estratégias passivas de arrefecimento no cálculo das necessidades da Norma ISO 13790: Método Passive Cooling Load Ratio (PCLR). Lisboa.

- OpenStudio. (3 de Outubro de 2015). *OpenStudio* / *OpenStudio*. Obtido em 3 de Outubro de 2015, de OpenStudio: <https://www.openstudio.net/>
- Panão, M. J. (2013). Aula 6. *Transferência de Calor em Edifícios: Método quase-estacionário*. Lisboa.
- Panão, M. J. (2013). Aula 7. *Transferência de Calor em Edifícios: Método Horário Simplificado*.
- Pinto, M., Silva, F. M., & Freitas, V. (2005). Modelos Preditivos para Ventilação Natural. Em *Revista Científica Nacional nº14* (pp. 33-38). Porto: Publindústria.
- Pombeiro, H., Pina, A., & Silva, C. (s.d.). Analyzing Residential Electricity Consumption Patterns. Portugal.
- Rainho, M. B. (2015). *Comparação dos metodos RC para o cálculo horario das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento na EN ISO 13790 e na proposta normativa ISO 52016-1*. Lisboa.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of art. *Energy and Buildings* 57, 74-94.
- Santamouris, M., Sfakianaki, A., & Pavlou, K. (2010). On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings. *Energy and Buildings* 42, 1309-1313.
- Santos, C. A., & Matias, L. (2006). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. Lisboa: LNEC.
- Silva, F. M. (2014). Aula teórica: Ventilação Natural. Lisboa.

Anexo A -Método Horário Simplificado (Modelo 5R1C)

Na secção 2.2 do Capítulo 3 efetuou-se o cálculo de todos os parâmetros necessários para obter a temperatura interior da zona térmica e posteriormente, as necessidades energéticas de arrefecimento.

O sistema de arrefecimento passivo considerado para o desenvolvimento deste estudo foi a ventilação. Assim sendo a habitação em estudo possui dois tipos de ventilação:

- A infiltração constante ao longo de todo o dia
- A ventilação imposta restrita ao período noturno

A condutância H_{ve} , na Figura 2 representa uma condutância equivalente englobando a infiltração e a ventilação (Representada na Figura 5). O cálculo desta condutância encontra-se explicitado detalhadamente no Capítulo 4 secção 4.3.1.

As condutâncias, $H_{tr,w}$ e $H_{tr,em}$ representam as condutâncias dos elementos leves e pesados constituintes da habitação, respetivamente.

A condutância $H_{tr,w}$ encontra-se explicitado no Capítulo 3.

Por outro lado o cálculo da condutância dos elementos pesados, $H_{tr,em}$, é obtido a partir da seguinte equação:

$$H_{tr,em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,opaco}} - \frac{1}{H_m}} \quad [W/K] \quad [38]$$

Em que,

$H_{tr,opaco}$ –Condutância dos elementos pesados obtido em Capítulo 3.

, $[W/K]$

H_m –Condutância entre as temperaturas T_s e T_m obtido a partir de [40], $[W/K]$

A condutância entre as temperaturas T_s e T_i , representada por $H_{tr,is}$ foi calculada da seguinte forma:

$$H_{tr,is} = h_{is} \times A_t \quad [W/K] \quad [39]$$

Onde,

$h_{is} = 3.45 W/m^2 .K$, Coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas interior e estrela (ISO13790:2007, 2007).

A_t –Área total de superfície em contacto com o volume interior, $[m^2]$

A condutância, $H_{tr,ms}$, entre as temperaturas T_s e T_m foi obtida por:

$$H_{tr,ms} = h_{ms} \times A_t \quad [W/K] \quad [40]$$

$h_{ms} = 9.1 W/m^2 \cdot K$, Coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas T_s e T_m (ISO13790:2007, 2007).

A_t —Área total de superfície em contacto com o volume interior, $[m^2]$

As equações utilizados para o cálculo das condutâncias foram obtido a partir do documento (Panão, Aula 7, 2013)

Os parâmetros C_m e A_m encontram-se calculados no Capítulo 3 secção 3.1.4.

Atentando ao apresentado na Norma ISO13790:2007, por simplificação, a razão entre a área das superfícies em contacto com o volume interior e a área de pavimento toma o valor de 4.5.

Logo o valor de área das superfícies em contacto com o volume interior é obtido através da seguinte equação:

$$A_t = \Lambda \times A_{pav} \quad [m^2] \quad [41]$$

Após a definição de todas as condutâncias, foi necessário proceder ao cálculo dos ganhos de calor proveniente da radiação solar e dos ganhos internos que entram em cada nodo de temperatura.

No primeiro nodo correspondente à temperatura interior, T_i , os ganhos provêm apenas dos ganhos internos. A fração de ganhos é obtida através de [42]:

$$\phi_i = 0.5 \times \phi_{int} \quad [W] \quad [42]$$

Em que,

ϕ_{int} —Ganhos internos definidos nos 3.3.

secção 3.3, $[W]$

Os restantes 50% de ganhos internos encontram-se distribuídos pelos restantes nodos.

No nodo T_s os ganhos que entram obtêm-se a partir da seguinte equação:

$$\phi_s = P_{rs} \times [(0.5 \times \phi_{int}) + \phi_{sol}] \quad [W] \quad [43]$$

Onde,

P_{rs} —Fator relativo à distribuição dos ganhos internos e solar no nodo T_s , [45], $[ad]$;

ϕ_{sol} —Ganhos solares obtidos a partir dos dados climáticos fornecidos (LNEG, 2014), $[W]$

Analogamente, os ganhos de calor no nodo T_m é dado por:

$$\phi_m = P_{rm} \times [(0.5 \times \phi_{int}) + \phi_{sol}] \quad [W] \quad [44]$$

P_{rm} —Fator relativo à distribuição dos fluxos de calor de ganhos internos e solar no nodo T_s , [46], $[ad]$;

Os fatores relativos à distribuição dos fluxos de calor referem-se à parcela convectiva e radiativa de cada nosso.

Calculou-se os fatores respeitando as seguintes equações:

$$P_{rs} = 1 - \frac{A_m}{A_t} - \frac{H_{tr,w}}{h_{ms} \times A_t} \quad [ad] \quad [45]$$

$$P_{rm} = \frac{A_m}{A_t} \quad [ad] \quad [46]$$

Em que,

A_m —Área de massa efetiva, $[m^2]$

A_t —Área total de superfície em contacto com o volume interior, $[m^2]$

$H_{tr,w}$ —Condutância dos vãos envidraçados, $[W/K]$

h_{ms} —Coeficiente de transferência de calor entre as temperaturas T_s e T_m , $[W/m^2 \cdot K]$

Por simplificação, os fatores de distribuição de ganhos internos e solares são iguais uma vez que se considerou que a área das janelas era reduzida quando comparada com a área total de superfície em contacto com o volume interior, $A_t - A_w \approx A_t$.

Após a definição de todos os elementos da rede térmica procedeu-se à resolução numérica do modelo.

Realizou-se o cálculo das seguintes condutâncias equivalentes:

$$H_1 = \frac{1}{\frac{1}{H_{ve}} + \frac{1}{H_{is}}} \quad [W/K] \quad [47]$$

$$H_2 = H_1 + H_{es} \quad [W/K] \quad [48]$$

$$H_3 = \frac{1}{\frac{1}{H_2} + \frac{1}{H_{ms}}} \quad [W/K] \quad [49]$$

Em seguida, foi necessário proceder ao cálculo dos diferentes nodos de temperatura através das equações:

$$T_{m,t} = \frac{T_{m,t-1} \times \left[\frac{C_m}{3600} - 0.5 \times (H_3 + H_{tr,em}) \right] + \phi_{mtot}}{\frac{C_m}{3600} + 0.5 \times (H_3 + H_{tr,em})} \quad [^\circ C] \quad [50]$$

$$T_m = T_{m,t} + T_{m,t-1} \quad [^\circ C] \quad [51]$$

$$T_s = \frac{H_{tr,ms} \times T_m + \phi_s + H_{tr,w} \times T_e + H_1 \times \frac{\phi_i + \phi_{nd}}{H_{ve}} + T_e}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_1} \quad [^\circ C] \quad [52]$$

$$T_i = \frac{H_{tr,is} \times T_s + H_{ve} \times T_e + \phi_i + \phi_{nd}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad [^\circ C] \quad [53]$$

Com $\phi_{m_{tot}}$,

$$\phi_{m_{tot}} = \phi_m + H_{tr,em} \times T_e + H_3 \times \frac{\phi_s + H_{tr,w} \times T_e + H_1 \times \frac{\phi_i + \phi_{nd}}{H_{ve}} + T_e}{H_2} \quad [W] \quad [54]$$

A partir do modelo é possível deduzir as necessidades de energia útil para arrefecimento para o caso de estudo. Assim sendo procedeu-se à implementação do seguinte procedimento:

- Considerar, em primeiro lugar, uma situação de *free-float* em que não existe qualquer tipo de sistema de climatização igualando, $\phi_{nd} = 0$. Assim é possível calcular a temperatura interior T_{i0} atingida caso não exista qualquer tipo de climatização. Este cálculo permite a avaliação através de um método comparativo se a temperatura interior da habitação se encontra superior ou inferior a uma temperatura de referência permitindo concluir se é necessário ou não utilização de sistema de climatização.
- Em segundo lugar, é necessário repetir o procedimento anterior considerando um fluxo do sistema de climatização de $10W/m^2$. Deste modo obtém-se o valor de temperatura interior T_{i10} que é possível atingir com o sistema de climatização instalado.
- Por fim para o cálculo das necessidades de climatização para a temperatura interior nunca ultrapassar a temperatura de referência é dada pela seguinte equação:

$$\phi_{nd} = \frac{T_{ref} - T_{i0}}{T_{i10} - T_{i0}} \times \phi_{nd_{10}} \quad [W] \quad [55]$$

A informação presente neste anexo tendo por base o descrito no Anexo C da Norma ISO 13790:2007 (ISO13790:2007, 2007)

Anexo B - Componentes Base da Simulação em EnergyPlus™

Controlo da Simulação (*Simulation Control*)

Este parâmetro indica como é que a simulação vai ocorrer e se vão existir dimensionamentos automáticos de alguns sistemas (Graça, Aula 2, 2015). Para este objeto marcou-se como afirmativa o parâmetro “*Run Simulation for Weather File Run Periods*” uma vez que a simulação será realizada tendo por base o ficheiro climático obtido a partir da base de dados do LNEG. Ignorando as restantes.

Edifício (*Building*)

Este objeto caracteriza a localização da habitação que se utilizou durante as simulações. Considerou-se:

- Eixo Norte: corresponde ao desvio do edifício relativamente ao Norte, como se pode observar na Figura 10 (EnergyPlus™, 2015). Nas simulações efetuadas considerou-se duas orientações possíveis. A primeira em que o edifício se encontrava orientado a norte tomando o valor de 0°C e uma segunda em que o edifício sofria uma rotação de 90°C.

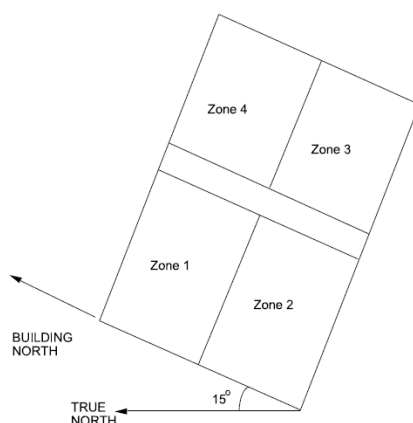


Figura 10: Definição do desvio do edifício relativamente ao Norte (EnergyPlus™, 2015)

- Terreno: Este parâmetro define o tipo de terreno que se encontra ao redor do edifício e que pode influenciar a forma como o vento atinge o edifício (EnergyPlus™, 2015). Considerou-se que para o caso de estudo o apartamento se encontra na cidade e por isso a opção escolhida foi a *City*.
- Distribuição Solar: o modelo em estudo ser convexo uma vez que tem a forma de um paralelepípedo e considera os sombreamentos de superfícies ou palas de sombreamento (nesta situação estas não existem). O parâmetro considerado foi *Full Interior and Exterior*.

Os restantes parâmetros estão relacionados com os números de dias que é necessário simular para que o sistema estabilize. Os valores para o valor de tolerância de convergência para a carga e para a temperatura foram admitidos os por defeito do *EnergyPlus* tal como o número de dias.

Timestep

Para o intervalo de simulação optou-se pelo valor 6 uma vez que é o indicado por defeito pelo programa quando se utiliza um sistema AVAC (Graça, Aula 2, 2015). A simulação foi realizada em intervalos de 10 em 10 minutos.

Localização (*Site Location*)

Este objeto especifica a localização do edifício (EnergyPlusTM, 2015).

Como o modelo em estudo foi simulado para 5 zonas climáticas de Portugal utilizaram-se os inputs apresentados na Tabela 8. Estes *inputs* correspondem às coordenadas utilizados nos ficheiros climáticos.

Período de Simulação (*RunPeriod*)

Este objeto indica os parâmetros necessários para que a simulação ocorra a partir do ficheiro climático fornecido (EnergyPlusTM, 2015). Aqui define-se o período em que ocorre a simulação.

Como se pretende avaliar o potencial de arrefecimento o período definido focou-se na estação de arrefecimento compreendo o dia 1 de Maio até 30 de Setembro.

Relativamente ao parâmetro de início da semana, utilizou-se por defeito a informação dada pelo ficheiro climático.

Considerou-se que o período de férias, dias festivos e período de *daylight saving* estão contemplados no ficheiro climático. Não se utilizou a regra para aplicar os dias típicos de férias ao período de fim de semana.

Como o ficheiro climático não possui indicadores de chuva e neve considerou-se classificou-se o parâmetro com não.

Este parâmetro define o ano de início da simulação (EnergyPlusTM, 2015). Como não se pretende avaliar um ano específico e o ficheiro climático utilizado corresponde a um ano médio não se preencheu o último parâmetro do objeto relativo ao “*Start Year*”

Os restantes parâmetros foram considerados por defeito os definidos pelo software

Horário (*Schedule*)

Este objeto pretende definir o horário de utilização, ocupação, set-points de temperatura, gestão de equipamentos AVAC entre outros (Graça, Aula 2, 2015).

Para o caso de estudo definiram-se horários anuais para set-points de temperatura, ganhos internos e horário de funcionamento.

Primeiramente é necessário definir o objeto:

Schedule TypeLimits

Este objeto caracteriza cada tipo de variável numérica e os valores limites utilizados nos horários que posteriormente serão definidos.

Assim sendo utilizaram-se os objetos fornecidos por defeito pelo programa:

- Temperatura com limite mínimo de -60°C e máximo de 200°C ;
- Fração com o intervalo entre $[0,1]$
- On/Off com a opção de 0 ou 1.

Após a definição das variáveis assumidas por cada tipo de horário definiram-se os horários com o objeto:

Schedule Compact

Onde se define cada um dos horários de controlo necessários para que a simulação ocorra como pretendido. Este horário é aplicado anualmente. Definiram-se os horários descritos no 0 secção 3.4.

Material

OS objetos apresentados em seguida caracterizam os materiais constituintes das superfícies, caixas de ar e vãos existente na habitação em estudo.

Material envolvente opaca (Material)

Este objeto descreve as propriedades térmicas dos materiais constituinte dos elementos opacos (EnergyPlusTM, 2015) como por exemplo, constituintes das paredes e de vãos opacos. As características encontram-se apresentadas no 0 secção 3.1.1 na Tabela 2.

O software EnergyPlus possui uma caracterização especial para colocar fachadas em contacto com superfícies adjacentes que se tem o mesmo comportamento térmico. Deste modo foi necessário para as fachadas em contacto com paredes adjacentes, teto e chão definir a sua constituição com metade da espessura dos materiais para depois as associar como superfícies adjacentes.

Caixa de Ar (Material AirGap)

As características da caixa de ar para os elementos de construção opacos (EnergyPlusTM, 2015) são descritas neste objeto.

Material vãos envidraçados (Window Material:Glazing)

Tal como os materiais anteriormente especificados os vidros são caracterizados neste objeto. Os valores assumidos encontram-se especificados no 0 secção 3.1.1 na Tabela 2 e as características óticas na Tabela 5.

Construção (Construction)

Após a caracterização de todos os materiais constituintes da envolvente é necessário definir a constituição de cada superfície e vão. As camadas são ordenadas da mais exterior para a interior.

A organização detalhada da envolvente encontra-se apresentada na Tabela 1.

Regras de Geometria Global (Global Geometry Rules)

Descreve a ordem pela qual as superfícies são definidas. (Graça, Aula 2, 2015) Nos parâmetros foram assumidos os dados por defeito provenientes do *software SketchUp*. Este objeto deve ser definido antes da caracterização pormenorizada das superfícies.

Detalhes da Superfície (Building Surface Detailed)

Este objeto caracteriza cada uma das superfícies térmicas opacas existentes no modelo (Graça, Aula 2, 2015). É necessário introduzir nome, tipo de superfície, construção, detalhes da condição fronteira e geometria da superfície.

Detalhes do Vão (*Fenestration Surface Detailed*)

Este objeto caracteriza as sub-superfícies térmicas, neste caso, os vãos envidraçados. Os parâmetros definem a localização, condição fronteira e geometria de cada um.

Definição da Caixilharia (*Window Property: Frame and Divider*)

As janelas possuem caixilharia de madeira como foi descrito anteriormente. Neste objeto colocou-se a espessura da caixilharia, a condutividade da madeira e os restantes parâmetros consideraram-se por defeito os do software.

Ganhos internos (*Other Equipment*)

Existem inúmeros objetos que caracterizam os ganhos internos que podem existir no modelo como por exemplo um objeto para os ganhos internos fornecidos pelas pessoas, iluminação, equipamento elétrico entre outros.

Como os ganhos definidos no modelo são globais considerando todas as fontes que podem contribuir para o fornecimento de energia ao modelo os ganhos foram especificados pelo objeto relativo a outros equipamentos.

Como existem duas situações de ganhos internos distinta, descritas em **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, criaram-se dois objetos.

AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado)

As necessidades de arrefecimento são obtidas a partir da instalação do sistema AVAC. Este sistema a partir dos dados de temperatura interior calcula a energia térmica que é necessária retirar para que a temperatura interior nunca ultrapasse o valor de 25°C durante a estação de aquecimento.

Introduziram-se dois objetos para efetuar o pretendido:

Set-point Temperatura para Sistema AVAC (*HVAC:Template Thermostat*)

Onde se definiu a temperatura de set-point de arrefecimento, 25°C. Relativamente à temperatura de aquecimento considerou-se 0°C, ou seja, que o AVAC só entraria em modo de aquecimento caso a temperatura interior fosse inferior a 0°C o que nunca acontece.

Sistema AVAC Ideal (*HVACTemplate: Zone: Ideal Load Air System*)

Este objeto define o funcionamento e características do sistema AVAC. O sistema escolhido foi um ideal colmata as necessidades energéticas sem consumir energia (EnergyPlus™, 2015). A eficiência global do sistema é de 100%.

Os parâmetros assumidos neste objeto foram considerados os por defeito pelo software tendo associado o objeto de controlo de set-point definido anteriormente, que o sistema estava sempre em condições para entrar em funcionamento.

